

В.А.Иванов, А.Н.Морозов, В.М.Кушнир, С.А.Шутов, В.В.Зима

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ТЕЧЕНИЯ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ, ADCP-НАБЛЮДЕНИЯ, СЕНТЯБРЬ 2011 ГОДА

Представлены данные по течениям, собранные с помощью акустического доплеровского профиломера течений (ADCP) в совместной экспедиции Морского гидрофизического института НАН Украины и Южного научного центра РАН. Экспедиция проходила с 26 по 29 сентября 2011 г. и охватила всю акваторию Керченского пролива. Во время экспедиции наблюдалась смена типа течений. Результаты измерений на качественном уровне согласуются с результатами численных расчетов. Полученные данные выявляют слоистую структуру поля скорости течений в южной части пролива и подтверждают существование локальной неоднородности распределения течений в окрестности канала Эни-Кале. Приводятся оценки числа Ричардсона для южной части пролива.

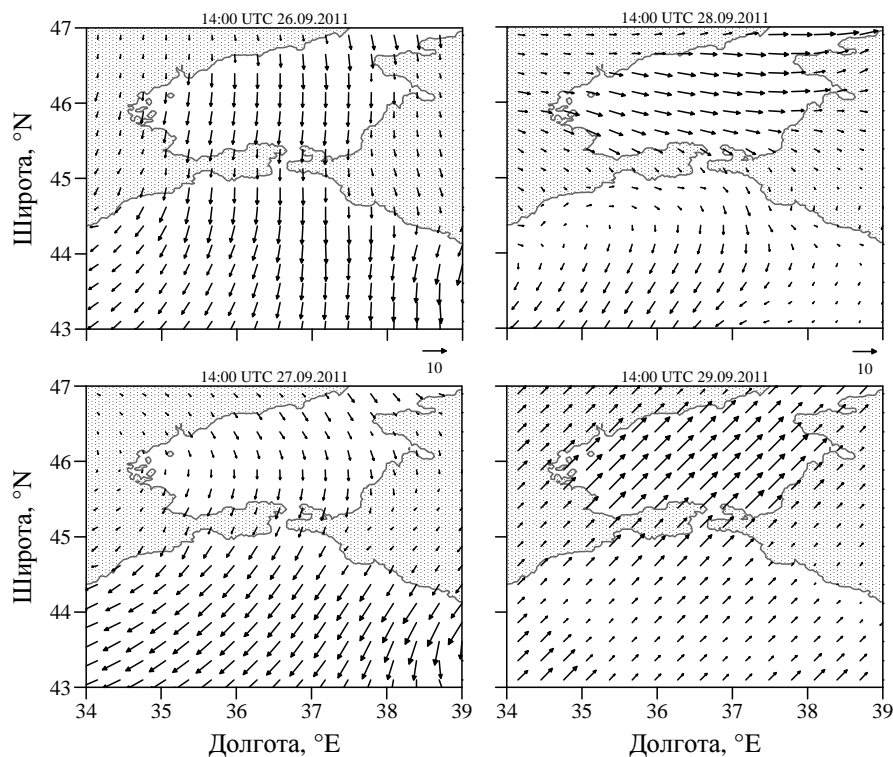
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *течения, ADCP, Керченский пролив.*

Керченский пролив является важным морским объектом экономики Украины, что в первую очередь связано с его активным использованием как транспортной магистрали соединяющей Черное и Азовское моря. Второй не менее важной, причиной является то, что транспорт вод через пролив в значительной степени определяет состояние экологии и гидрологии Азовского моря, которое в свою очередь представляется важным рыбным промысловым районом. В связи с этим исследование гидрофизических полей акватории пролива всегда рассматривалось как важная задача, имеющая научное и прикладное значение. В последние годы внимание к Керченскому проливу особенно усилилось после строительства дамбы и серии резонансных катастроф, например, осенью 2007 г. Это привело к созданию ряда государственных мониторинговых программ, обеспечивающих регулярные натурные наблюдения в проливе [1]. В настоящее время создано большое количество моделей для оценки экологической ситуации, прогноза распространения загрязнений, изучения литодинамических процессов и динамики вод Керченского пролива [2 – 7]. Поэтому натурные наблюдения, в настоящее время, в основном используются для верификации и отладки существующих моделей. В этом отношении результаты комплексных исследований Керченского пролива, выполненных совместной экспедицией Морского гидрофизического института НАН Украины и Южного научного центра РАН 26 – 29 сентября 2011 г., представляют несомненный интерес. В экспедиции выполнялись гидрологические, гидрохимические, гидрооптические и космические съемки Керченского пролива, включая российскую и украинскую зоны акватории.

В настоящей статье обсуждение результатов экспедиции акцентировано на детальном представлении данных по течениям, полученных с помощью акустического доплеровского профиломера течений (ADCP).

Условия проведения измерений. Экспедиция проходила с 26 по 29 сентября 2011 г., измерения выполнялись в светлое время суток (с 7:00 до 18:00,

© В.А.Иванов, А.Н.Морозов, В.М.Кушнир, С.А.Шутов, В.В.Зима, 2012



Р и с . 1 . Эволюция поля скорости ветра в Азово-Черноморском регионе с 26 по 29 сентября 2011 г. по данным [8].

время UTC) и охватили акваторию от южной до северной границ Керченского пролива. На протяжении экспедиции ветровая ситуация в регионе значительно изменялась. Эволюция поля скорости ветра над Азово-Черноморским бассейном приведена на рис.1 (данные получены на сайте отдела взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины [8]). На рис.2 приведена зависимость от времени среднесуточных значений меридиональной (серый пунктир) и широтной (черный пунктир) компонент скорости ветра и её проекции на продольную ось (45°) северной узости (черная сплошная линия). Смена знака проекции скорости ветра в ночь с 27 на 28 сентября указывает на возможность перестройки типа течений во время проведения экспедиции.

Приборы. В качестве измерителя течений использовался ADCP модель WHM1200 (рабочая частота 1200 кГц), производства TRDI США. Прибор



Р и с . 2 . Зависимость скорости ветра в северной узости пролива от времени по данным <http://vao.hydrophys.org>. Черная сплошная линия – проекция на продольную ось (45°).

был установлен на штанге, жестко прикрепленной к борту маломерного судна, так чтобы, глубина положения его преобразователей составляла 0,5 м на спокойной воде. Запись данных производилась непрерывно в течение каждого дня с 26 по 28 сентября. Параметры работы *ADCP* устанавливались следующие: дискретность по глубине 0,5 м; дискретность по времени 0,2 с, с осреднением по 5 ансамблям; дальность опции *Bottom Track (BT)* – отслеживание дна) 20 м. Слой измерений по глубине составил от 1,5 м от поверхности моря до 1,5 м от дна. Обработка данных выполнялась с учетом влияния корпуса судна на показания магнитного компаса прибора, на основе *GPS*- и *BT*-данных с использованием программного обеспечения, разработанного в МГИ НАН Украины [9, 10].

В качестве *CTD*-зонда использовался гидрологический автономный прибор ГАП16 МГИ НАН Украины.

Результаты измерений. Измерения течений выполнялись на ходу судна в период с 26 по 28 сентября. На рис.3 черными стрелками представлены векторы скоростей течений на трех горизонтах для каждого дня экспедиции. Верхний ряд – течения на глубине 1,5 м от поверхности моря, средний – на половине глубины моря, нижний – 1,5 м над дном. В первый день экспедиции 26 сентября (левая колонка) наблюдается хорошо выраженный азовский тип течений, в северной узости они направлены из Азовского в Черное море. На всех горизонтах в узких частях пролива движение вод имеет одинаковое направление. В южной части пролива наблюдаются разные направления течений на разных горизонтах. Здесь в верхнем слое доминируют течения юго-западных направлений, в нижних – восточных. Азовский тип течений сохраняется и на следующий день, 27 сентября (средняя колонка) – между северо-восточной оконечностью о-ва Коса Тузла и Павловским мысом доминируют течения южного направления, поток воды в районе промоины направлен из Таманского залива в Керченский пролив. В южной части пролива наблюдается разнонаправленность скорости течений на разных горизонтах. В последний день измерений 28 сентября (правая колонка) наблюдается выраженный черноморский тип течений, в северной узости они направлены из Черного моря в Азовское. В северной предпроливной зоне отмечается изменение направления течений с глубиной.

Обсуждение. Измерения, выполненные в ходе экспедиции, показывают смену типа течений с азовского на черноморское в период с 27 на 28 сентября, что соответствует имеющимся представлениям о взаимосвязи течений в Керченском проливе с поведением ветра [11 – 13].

Распределение течений в центральной части пролива, полученное по данным *ADCP*-наблюдений, на качественном уровне согласуется с результатами других натурных наблюдений [1, 14 – 16] и численных экспериментов [2 – 7] в части сохранения направления течений и уменьшения модуля его скорости с глубиной.

Хорошее соответствие полученных данных с результатами численных экспериментов наблюдается в окрестности промоины между о-вом Коса Тузла и дамбой (26 сентября 2011 г.). На рис.4, *a* приведено положение разреза, на рис.4, *b* – распределение модуля скорости течения на глубине 1,5 м (черная) и глубины моря (серая линия) в зависимости от долготы. В промоине

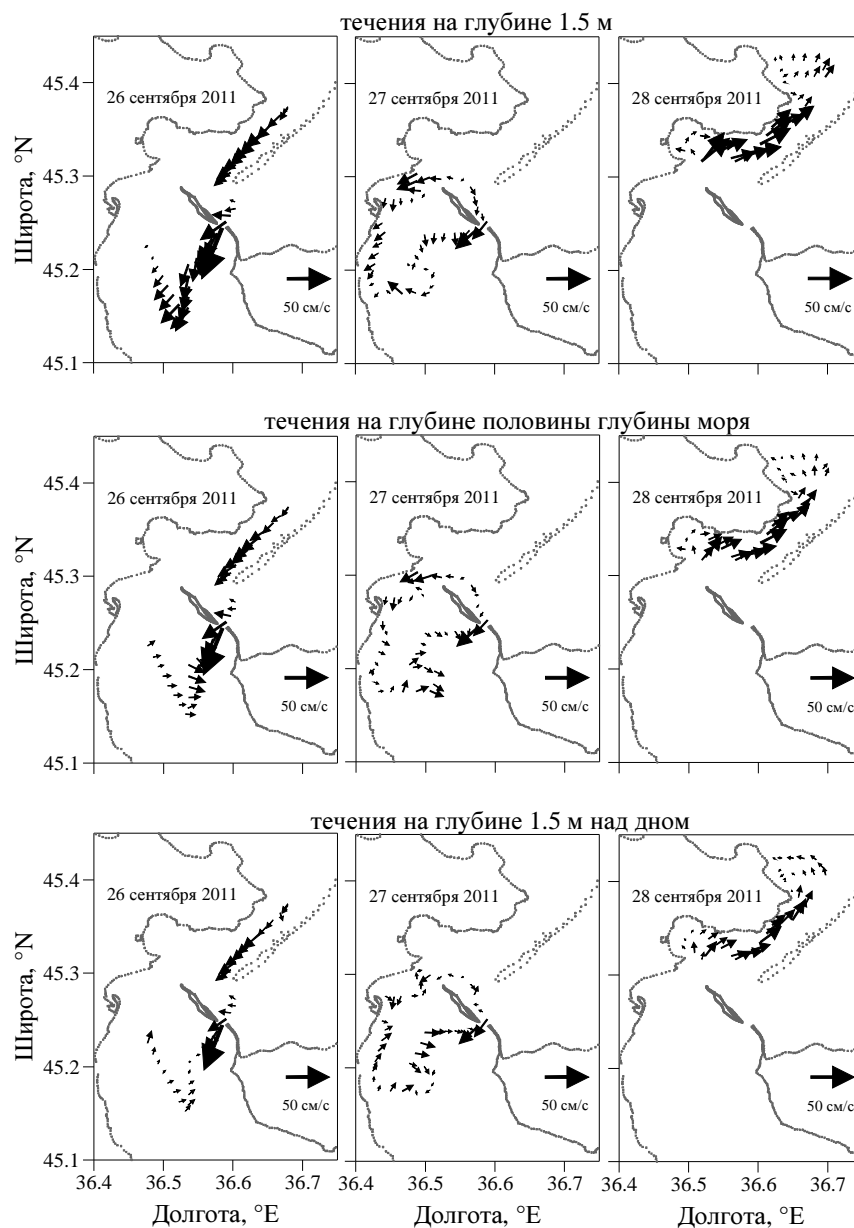
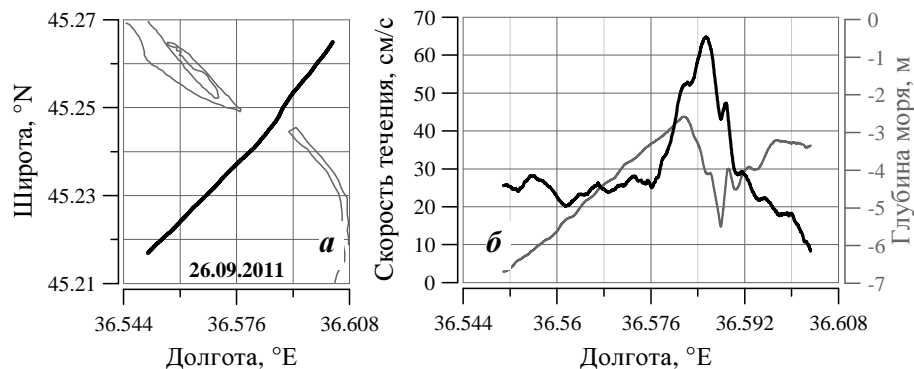


Рис. 3. Распределение течений на разных горизонтах по данным ADCP-измерений с 26 по 28 сентября 2011 г.

наблюдается увеличение скорости течений до 60 см/с, на расстояниях более 1 км от её центра скорость течений составляет 20 – 25 см/с. Наблюдаемые характерные значения скорости и горизонтальные масштабы ее изменчивости в окрестности промоины, полученные по данным измерений, хорошо согласуются с результатами численных экспериментов для аналогичных ветровых условий [3].

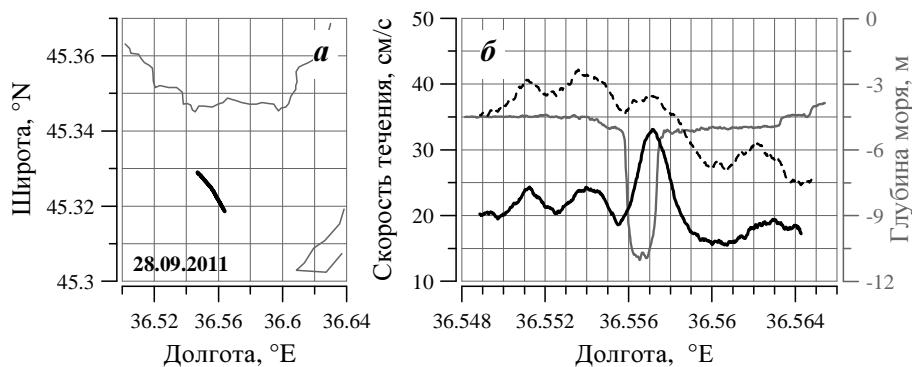
Результаты измерений (28 сентября 2011 г.) показывают заметное увеличение скорости течений в окрестности фарватера центральной части пролива



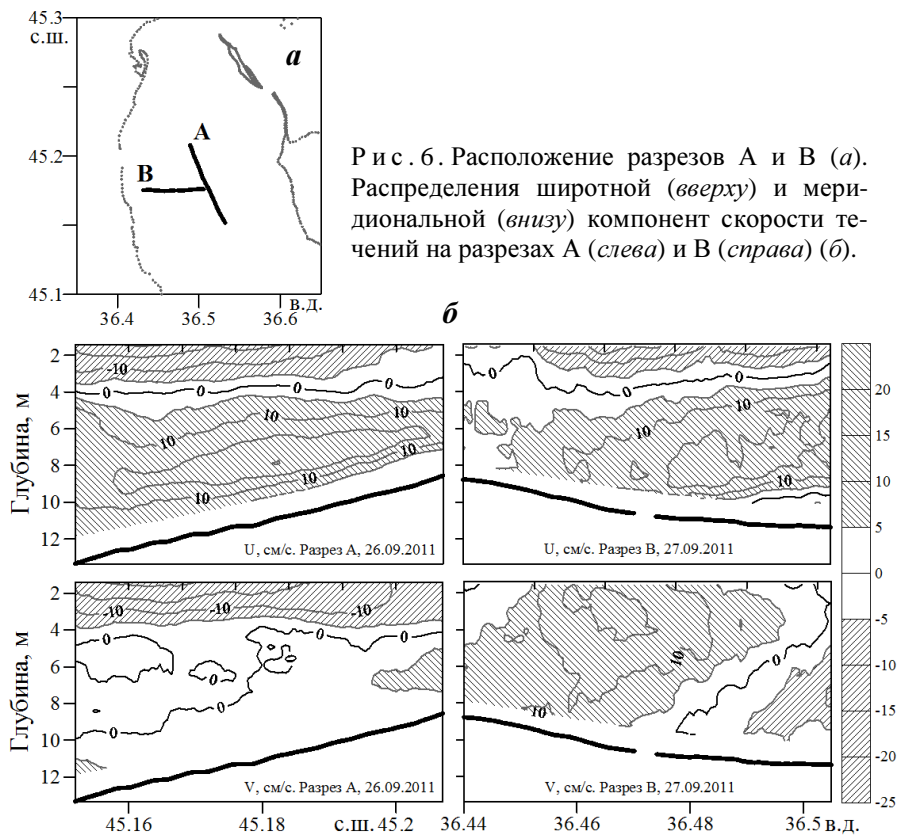
Р и с . 4 . Положение разреза (а) и распределение модуля скорости течений на глубине 1,5 м (б, —). Серая линия – глубина моря.

(канал Эни-Кале). На рис.5, а приведено положение разреза, на рис.5, б – распределение модуля скорости течения на глубине 1,5 м (черный пунктир), 3 м (черная сплошная) и глубины моря (серая линия) вдоль разреза. Относительное увеличение скорости течений (1,5 раза), на момент наблюдений наиболее хорошо выражено в слоях моря ниже 2 м от поверхности. В восточной части разреза наблюдается пространственная изменчивость скорости течений с размахом 5 см/с и характерным горизонтальным масштабом 300 – 500 м, которая может быть вызвана баротропной неустойчивостью потока [17] (горизонтальные градиенты значительно превосходят значение локальной инерционной частоты 10^{-4} с^{-1} и достигают значений $0,002 \text{ с}^{-1}$, число Кибеля-Россби $Ki = 20$). Относительное увеличение скорости течений в окрестности фарватера проявлялось и ряде других наблюдений [15, 16], выполненных в различные сезоны при различных ветровых ситуациях. Форма представления результатов численного моделирования [2 – 7] не позволяют выявить столь мелкомасштабной горизонтальной неоднородности и оценить их согласованность с данными измерений.

Южная часть Керченского пролива с точки зрения экологической безопасности представляется наиболее опасным районом, где скопление судов обусловлено наличием рейдовых стоянок, на которых осуществляется пере-



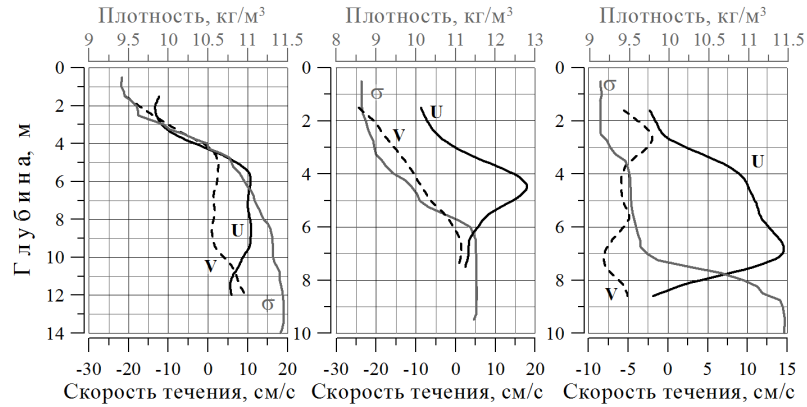
Р и с . 5 . Положение разреза (а) и распределение течений (б) на глубине 1,5 (---) и 3 м (—) в зависимости от долготы. Серая линия – глубина моря.



Р и с . 6. Расположение разрезов А и В (а). Распределения широтной (вверху) и меридиональной (внизу) компонент скорости течений на разрезах А (слева) и В (справа) (б).

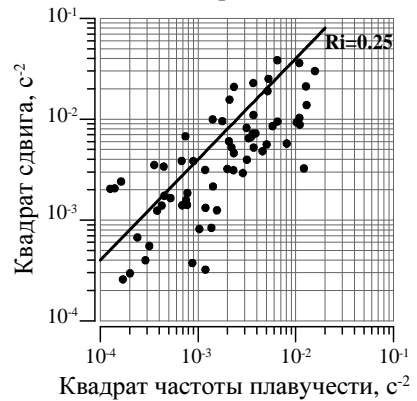
вал грузов, в том числе опасных [18]. Численное моделирование динамики вод в этом районе выявляет двунаправленную вертикальную структуру поля скорости течений [2], что усложняет расчеты переноса взвесей и прогноза их распространения. В обсуждаемой экспедиции работы в южной части пролива выполнялись в течение двух дней и выявили слоистую вертикальную структуру течений, предсказанную численными экспериментами [2 – 7] и обусловленную особенностями морфометрии акватории. На рис.6, а приведено расположение разрезов. На рис.6, б приведено пространственное распределение компонент скорости течений вдоль разрезов А и В – слева (26 сентября) и справа (27 сентября) соответственно. В верхней части рисунка представлена широтная компонента, в нижней – меридиональная. Распределения восточной компоненты проявляет похожие черты в обоих случаях, в верхних слоях до глубины 4 м компонента характеризуется отрицательными значениями, в нижних слоях моря наблюдаются положительные значения компоненты, достигающие 15 см/с. Слоистая структура поля скорости течений наблюдается во всех записях прибора, сделанных в южной части пролива с глубиной моря более 5 м.

Натурные измерения, представленные в [16], показывают согласованность вертикального строения поля скорости течений и распределения условной плотности. На рис.7 приведены примеры профилей компонент скорости течений и плотности, полученные в разных районах южной части пролива. Здесь также наблюдается соответствие положений локального пик-



Р и с . 7 . Примеры профилей компонент скорости течений U (—), V (- - -) и условной плотности σ (—) на разных станциях в южной части Керченского пролива.

ноклина и слоев максимального сдвига течений. В южной части пролива происходит взаимодействие вод Азовского и Черного морей и наблюдаемое вертикальное распределение гидрологических параметров может являться следствием динамики вод [2 – 7]. На рис.8 в логарифмическом масштабе приведена зависимость квадрата вертикального сдвига скорости течений ($Sh^2 = U_z^2 + V_z^2$) от квадрата частоты плавучести ($N^2 = g \cdot \rho^{-1} \cdot \rho_z$), полученная для всех гидрологических станций, выполненных в южной части пролива. Следует отметить значительный статистический разброс указанных параметров. При этом среднее значение числа Ричардсона ($Ri = N^2 \cdot Sh^{-2}$) составляет 0,67, с.к.о. 0,48. Толстая черная линия соответствует критическому значению числа Ричардсона (0,25), меньше которого возможно возникновение бароклинной неустойчивости [19]. В 20 % случаев число Ричардсона меньше критического значения, что наблюдается исключительно в верхнем слое и свидетельствует о возможности диапикнического перемешивания.



Р и с . 8 . Зависимость квадрата вертикального сдвига течений от квадрата частоты плавучести.

Заклучение. Результаты экспедиции хорошо согласуются как с результатами численных экспериментов, так и с результатами ранее выполненных измерений. Полученные данные подтверждают наличие особенности горизонтального распределения течений (с масштабом около 200 м) в окрестности фарватера. Отмечается слоистая структура течений в южной части Керченского пролива.

Работа выполнена в рамках проекта НАН Украины «Черное море как имитационная модель Мирового океана», совместного проекта РФФИ 11-05-90439-Укр_ф_а и ДФФД Ф40 68: «Разработка базовой технологии мониторинга гидрофизических, литодинамических и продукционных процессов

в Азовском море и в Керченском проливе в целях создания согласованных подходов обеспечения их экологической безопасности и рационального использования ресурсов» (шифр «Технология») и при поддержке *PERSEUS-FP7*, контракт №287600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джиганшин Г.Ф., Мотыгин А.С., Морозов А.Н., Шутов С.Ф.* Гидрофизическая характеристика Керченского пролива в декабре 2009 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып. 23.– С.153-158.
2. *Тучковенко Ю.С.* Численная модель циркуляции вод в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – вып.1(6).– С.223-232.
3. *Иванов В.А., Шатино Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.207-232.
4. *Фомин В.В.* Современное моделирование течений и ветрового волнения в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал.– 2007.– № 5.– С.3-13.
5. *Рябцев Ю.Н., Терещенко И.В., Шатино Н.Б.* Моделирование бризовой циркуляции вод в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал.– 2007.– № 6.– С.16-27.
6. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.
7. *Моделирование динамики вод в Керченском проливе и предпроливных зонах /* Под ред. Иванова В.А.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 206 с.
8. <http://vao.hydrophys.org>
9. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М.* Опыт использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в условиях Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.12.– С.457-476.
10. *Морозов А.Н., Павлов В.К.* Коррекция данных VMADCP // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– С.45-51.
11. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– С.-Пб: Гидрометеоиздат, 1991.– 324 с.
12. *Альтман Э.Н.* Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // Океанология.– 1970.– т.Х, вып.3.– С.438-447.
13. *Альтман Э.Н.* Исследование водообмена между Черным и Азовским морями // Сб. работ ЛЮМ ГОИН.– 1972.– т.10, вып.11.– С.3-47.
14. *Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Саркисов А.А.* Климатическая характеристика системы течений в Керченском проливе // Докл. НАНУКrainны.– 2005.– № 1.– С.100-103.
15. *Ломакин П.Д., Боровская Р.В.* Возможность контроля системы течений в Керченском проливе на базе спутниковой информации // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– С.255-257.
16. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Керченском проливе по данным ADCP наблюдений 2008 – 2009 годов // Экологическая без-

опасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.253-267.

17. *Pedley T.J.* On the stability of viscous flow in a rapidly rotating pipe // *J. Fluid Mech.*– 1969.– 36.– P.177-222.
18. *Лоева И.Д., Павленко Н.Е., Коморин В.Н., Орлова И.Г.* Научно-методические и правовые аспекты системы защиты морских акваторий от загрязнения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.319-327.
19. *Miles J.W.* On the stability of heterogeneous shear flows // *J. Fluid Mech.*– 1961.– 10.– P.496-508.

Материал поступил в редакцию 17.06.2012 г.

АНОТАЦІЯ Представлені дані по течіям, зібрані за допомогою акустичного доплерівського профілемера течій (ADCP) у спільній експедиції Морського гідрофізичного інституту НАН України та Південного наукового центру РАН. Експедиція проходила з 26 по 29 вересня 2011 р. і охопила всю акваторію Керченської протоки. Під час експедиції спостерігалася зміна типу течій. Результати вимірювань на якісному рівні узгоджуються з результатами чисельних розрахунків. Отримані дані виявляють шарувату структуру поля швидкості течій у південній частині протоки і підтверджують існування локальної неоднорідності розподілу течій в околиці каналу Ені-Кале. Наводяться оцінки числа Річардсона для південній частині протоки.

ABSTRACT The current data, collected by using the acoustic Doppler currents profiler (ADCP) in a joint cruises of the Marine Hydrophysical Institute of NAS of Ukraine and the Southern Scientific Center RAS. The cruise took place from 26 to 29 September, 2011 and covered the entire area of the Kerch Strait. During the cruise, a change of the current type is revealed. The measuring results are qualitatively consistent with the results of numerical calculations. The data obtained reveal the layered structure of the field of velocity in the southern part of the strait, and confirm the existence of local inhomogeneity distribution of currents in the vicinity of Eni-Kale channel. The estimates of the Richardson number for the southern part of the strait are given.