

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

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ТЕЧЕНИЯ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ
ПО ДАННЫМ ADCP НАБЛЮДЕНИЙ 2008 – 2009 гг.**

Систематизированы ADCP данные пяти экспедиций, выполненных в районе Керченского пролива в различные сезоны 2008 – 2009 гг. Рассмотрены методические вопросы проведения измерений. Приведены значения транспорта вод через различные сечения пролива. Рассмотрены основные особенности горизонтального и вертикального строения поля скорости течений в различных частях пролива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ADCP, профиль течения, экспедиционные исследования, натурные данные, Керченский пролив.

Керченский пролив длительное время остается объектом пристального внимания ученых, что в первую очередь связано с активным использованием пролива 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, важного рыбного промыслового района с береговой линией, привлекательной для развития курортного бизнеса. Инструментальное исследование динамики вод в проливе началось в 70-х гг. XX в. На основе натурных данных были получены полуэмпирические соотношения, определяющие зависимость транспорта вод через пролив от разности уровней на его концах и проекции ветра на его продольную ось [1 – 3]. В последнее десятилетие развито большое количество численных моделей для расчета установившейся циркуляции вод в проливе и прилегающих акваториях в зависимости от силы и направления ветра действующего достаточно длительное время [4 – 6]. На современном этапе моделирование развивается в направлении создания оперативных моделей динамической ситуации в проливе с привлечением данных различных систем наблюдений, включая спутниковые, береговые и интернет продукты крупномасштабного моделирования [7]. Одним из важных вопросов численного моделирования, в настоящее время, является установление соответствия модельных расчетов реальным данным. Для решения этого вопроса использование акустического доплеровского профиломера течений (ADCP), размещаемого на борту маломерного судна, представляется наиболее удачным, поскольку позволяет воспроизводить пространственное распределение течений вдоль пути следования судна.

Цель данной работы систематизация данных, собранных с помощью ADCP, в пяти экспедициях 2008 – 2009 гг. в Керченский пролив, выполненных отделом гидрофизики шельфа Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины, и детальное представление выявленных особенностей пространственного распределения течений в различных частях акватории.

В ходе экспедиций для измерения профилей течений использовался ADCP WHM-1200 (*Work Horse Monitor*) производства RDI США. Рабочая частота 1200 кГц, номинальная глубина измерения до 15 м. Дискретность по глубине устанавливалась 0,5 м, дискретность по времени 0,3 с. При проведении измерений прибор жестко крепился к левому борту маломерного судна на специально изготовленной раме. Средняя глубина положения прибора составляла 0,5 м и регистрировалась с помощью встроенного датчика давления. Каждый цикл измерялись профили относительной скорости течения (опция *Water Profiling*), скорость движения ADCP относительно дна и расстояние от прибора до дна (опция *Bottom Track*). Управление прибором и контроль данных выполнялись с использованием стандартных программ WinSC и WinADCP, разработанных RDI.

Профиломер позволяет получить данные в ограниченном слое водного столба, что определено технологией измерения профиля течений, заложенной изготовителем. Верхняя граница слоя измерения может быть определена по соотношению:

$$\delta H_{up} = H_{ADCP} + H_{Blank} + H_{BinSize}, \quad (1)$$

где δH – расстояние от поверхности моря до середины первого сегмента измерения (*Bin*), H_{ADCP} – глубина положения прибора, определяемая по показаниям датчика давления, H_{Blank} – “мертвая” зона (*Blank Distance*), определяемая временем необходимым для затухания акустических колебаний в корпусе прибора после излучения зондирующего импульса, $H_{BinSize}$ – размер сегмента или дискретность по глубине. В среднем на протяжении экспедиций верхняя граница слоя измерения составляла от 1 до 2 м. В придонной области существует зона, где получаемые данные становятся некорректными вследствие смешивания обратно рассеянных и отраженных от дна акустических сигналов. Нижняя граница слоя может быть определена по соотношению:

$$\delta H_{Bot} = (H_{Bot} - H_{ADCP}) \cdot (1 - \cos 20^\circ) + H_{BinSize}, \quad (2)$$

где δH_{Bot} – расстояние от нижней границы слоя до дна, H_{Bot} – глубина моря. Первый сомножитель правой части соотношения определяется по данным ADCP (опция *Bottom Track*), угол 20° соответствует угловой ориентации трансдюсеров прибора WHM-1200. Номинальное значение нижней границы для выполненных экспедиций составляло от 1 до 2 м от дна.

Влияние корпуса судна на показания магнитного компаса прибора компенсировалось в соответствии с методикой, изложенной в [8], на основе данных глобальной системы позиционирования (*GPS*) и данных о скорости прибора относительно дна (опция *Bottom Track*). Синхронизация ADCP и *GPS* данных обеспечивалась на этапе запуска ADCP путем установки внутренних часов прибора по времени *UTC*. Рассогласование углов в процессе измерения изменялось в диапазоне от -70 до 70° , в зависимости от курсового угла плавсредства и расположения прибора на борту. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения, разработанного в МГИ.

В работе приняты обозначения: u , v — восточная и северная компоненты скорости течения; u_p , v_p — компоненты скорости течения вдоль разреза и перпендикулярная к нему. Средняя по глубине скорость течения ($\bar{u}$) оценивалась по соотношению:

$$\bar{u} = \frac{1}{J_{Bot}} \cdot \sum_{j=1}^{J_{Bot}} u_j, \quad (3)$$

где J_{Bot} – ближайший ко дну сегмент глубины, в котором измерения можно считать корректными (2), u_j – измеренная в j -ом сегменте глубины скорость течения. Полный поток F_u и транспорт вод через поперечное сечение разреза T_p оценивались по соотношениям:

$$F_u \cong \frac{H_{Bot}}{J_{Bot}} \cdot \sum_{j=1}^{J_{Bot}} u_j, \quad (4)$$

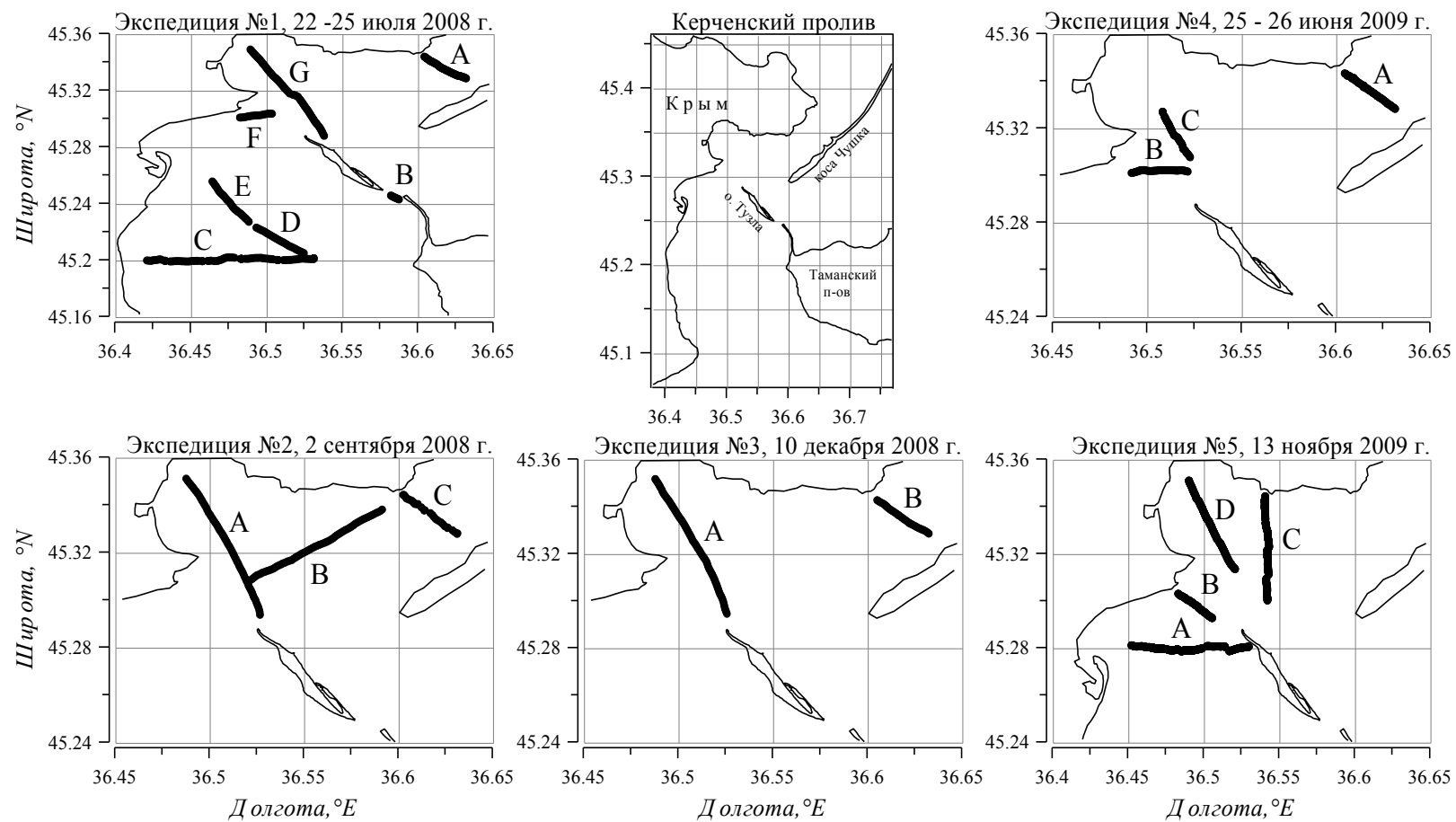
$$T_p = \int_0^R \bar{v}_p \cdot H_{Bot} \cdot dr, \quad (5)$$

где R – расстояние между начальной и конечной точкой разреза, r – расстояние вдоль разреза.

В качестве CTD зонда на дрейфовых станциях использовался ГАП-16, производства МГИ. Результирующие профили интерполировались на сетку 0,25 м по глубине.

На рис.1 схематично приведены разрезы, выполненные в ходе экспедиций 2008 – 2009 гг. в район Керченского пролива. Графики выполнены для каждой экспедиции по отдельности и содержат надписи, достаточно отражающие содержание графического материала. Треки судна или разрезы представлены на графиках толстыми черными линиями, тонкими линиями обозначены контуры берегов пролива. Для удобства восприятия информации, на отдельном графике, вверху по центру, приведены очертания береговой линии пролива, полученные на основе спутникового снимка. График выполнен с соблюдением пропорций линейных расстояний по широте и долготе. В ходе экспедиций измерения выполнялись в различных частях пролива в разные сезоны, благодаря этому, собранные данные могут оказаться полезными как для валидации, так и для регулирования параметров моделей динамики вод в Керченском проливе. В табл.1 представлены сводные данные по всем пяти экспедициям. Разрезы, для каждой экспедиции по отдельности, идентифицированы латинскими буквами в соответствии с обозначениями рис.1, первый столбец. Второй столбец – дата, третий – время UTC, соответствующее нахождению судна в центре разреза. Скорость движения судна вдоль разрезов составляла около 2,5 м/с. Угол, приводимый в четвертом столбце – угол между выбранным положительным направлением перпендикуляра к разрезу и направлением на север, за положительное направление вращения принято вращение по часовой стрелке (далее по тексту углы определены аналогично). Пятый столбец – длина разреза. В шестом столбце таблицы представлены осредненные по разрезу оценки восточной и северной компонент полных потоков. Седьмой столбец – оценка транспорта вод через поперечное сечение разреза, знак определяет направление транспорта по отношению к выбранному положительному направлению перпендикуляра.

В ходе самой продолжительной экспедиции № 1, было зарегистрировано изменение типа водообмена между Черным и Азовским морями. Азовский тип водообмена характеризуется направлением течений из Азовского в Черное море, при черноморском типе водообмена течения направлены из Черного в Азовское море. С 22 по 24 июня 2008 г. наблюдался Азовский тип течений



Р и с . 1 . Расположения разрезов в Керченском проливе.

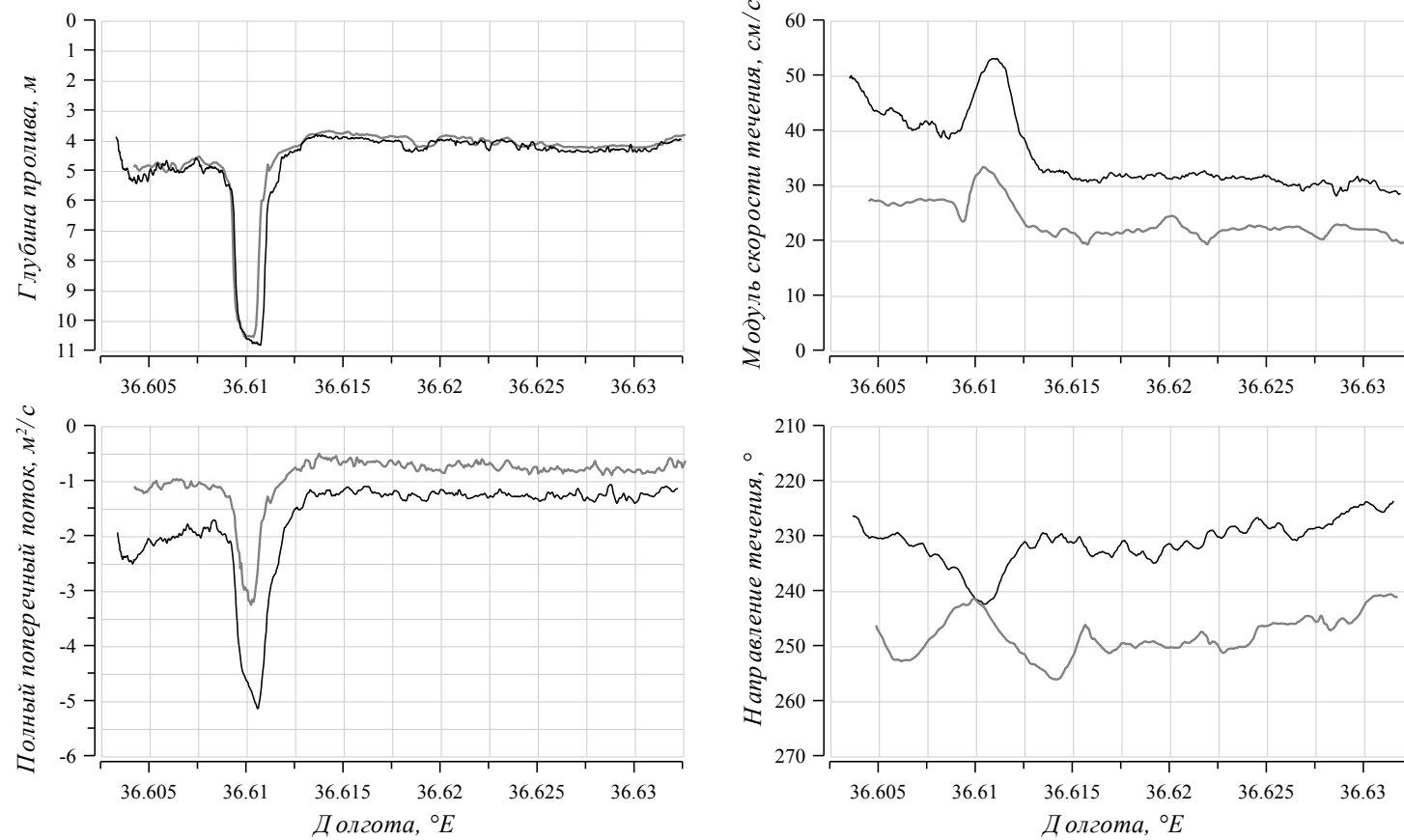
Т а б л и ц а 1. Сводные данные по экспедициям.

№	дата (д.м.г)	время (ч.м)	угол (°)	длина (м)	поток (м ² /с)		транспорт (м ³ /с)
					F_u	F_v	
экспедиция № 1, 22 – 25 июля 2008 г.							
A	22.07.2008	10:09	38	2773	– 1,335	– 1,03	– 4530
B	23.07.2008	13:35	35	528	– 0,427	– 1,890	– 947
C	24.07.2008	13:09	0	8625	– 0,235	– 0,681	– 5874
D	24.07.2008	14:05	39	3233	– 0,178	– 0,007	– 380
E	24.07.2008	14:27	59	3749	– 0,258	– 0,784	– 2343
F	24.07.2008	15:53	– 9	1708	– 1,847	– 0,838	– 920
G	25.07.2008	06:02	60	7789	0,058	0,437	2093
экспедиция № 2, 2 сентября 2008 г.							
A	02.09.2008	06:51	64	7115	– 0,182	– 0,406	– 2430
B	02.09.2008	14:36	– 31	6510	– 2,118	– 0,903	2063
C	02.09.2008	16:10	38	2910	– 1,308	– 0,990	– 4614
экспедиция № 3, 10 декабря 2008 г.							
A	10.12.2008	08:08	65	7029	– 0,318	– 0,075	– 2249
B	10.12.2008	15:20	38	2712	– 1,031	– 0,443	– 2565
экспедиция № 4, 25 – 26 июня 2009 г.							
A	25.06.2009	15:36	38	2697	– 1,649	– 0,879	– 4460
B	26.06.2009	14:14	0	2333	– 0,063	0,482	1124
C	26.06.2009	14:46	63	2436	0,686	0,427	1968
экспедиция № 5, 13 ноября 2009 г.							
A	13.11.2009	08:45	0	6090	– 0,003	0,639	3892
B	13.11.2009	09:56	33	2120	0,967	0,954	2813
C	13.11.2009	11:19	90	4920	0,751	0,158	3695
D	13.11.2009	13:35	57	4818	– 0,171	1,078	2138

(разрезы A – F), а 25 июня Черноморский (разрез G). В экспедициях № 2 (2 сентября 2008 г.) и № 3 (10 декабря 2008 г.), был зарегистрирован Азовский тип течений. В ходе экспедиции № 4 (с 25 по 26 июня 2009 г.) было зарегистрировано изменение типа течений с Азовского (разрез A) на Черноморский (разрезы B, C). Изменение произошло в течение одних суток. В экспедиции № 5 (13 ноября 2009 г.) наблюдался Черноморский тип водообмена. Приведенные табличные данные дают достаточно общее представление о картине течений в разных районах пролива при разных типах течений, но не позволяют увидеть в деталях характерные особенности их пространственного распределения. Далее приведем примеры распределения течений, полученные в северной, центральной и южной частях Керченского пролива.

Северная узость, часть пролива между косой Чушка и Крымским п-овом, характеризуется протяженностью около 10 км, при средней ширине около 4 км, продольная ось отклонена на 45° (по часовой стрелке) от северного

направления. Благодаря относительно небольшой ширине эта часть пролива является наиболее удобной для экспериментального исследования водообмена между Черным и Азовским морями. Именно в этой части пролива в 70-х гг. XX в. на разрезе порт Крым – порт Кавказ были начаты измерения течений с целью получения инструментальной оценки водообмена между морями [1 – 3], и привели к установлению полуэмпирических зависимостей расхода воды от разности уровня моря на концах пролива и силы и направления ветра. В более позднее время, полученные зависимости часто использовались для постановки граничных условий (или для замыкания системы уравнений) в численном моделировании динамики вод в проливе [4 – 6]. Ежемесячные измерения течений в северной узости непрерывно продолжаются до настоящего времени, и выполняются с помощью контактного измерителя течений путем выдержки прибора на заданных горизонтах глубины в определенных точках разреза порт Крым – порт Кавказ. В ходе экспедиций № 1 – № 4 в северной узости были выполнены измерения распределения течений с помощью ADCP на ходу судна. Использование ADCP в таком режиме позволяет, на сегодняшний день, получить наиболее детальную картину пространственного распределения течений вдоль пути следования судна и выявить характерные особенности как горизонтальной, так и вертикальной структуры поля скорости течений. На рис.2, в качестве примера, представлены результаты измерений экспедиций № 1 (черные линии, разрез А) и № 3 (серые линии, разрез В). На графике сверху слева приведена зависимость глубины пролива вдоль разреза от долготы, полученная по данным ADCP (опция *Bottom Track*). Измерения показывают наличие ярко выраженного искусственного углубления или фарватера глубиной около 11 м и шириной около 200 м. Западной фарватера глубина пролива составляет в среднем около 5 м, восточной 4 м. На рис.2, внизу слева, приведено распределение оценки полного потока поперек разреза в зависимости от долготы. Как можно видеть из графика, в области фарватера наблюдается ярко выраженный максимум, восточной и западной фарватера полные потоки почти постоянны. Для экспедиции № 1 поток в фарватере достигает $5 \text{ м}^2/\text{с}$, западной фарватера – составляет около $2 \text{ м}^2/\text{с}$, восточной – около $1,24 \text{ м}^2/\text{с}$. Для экспедиции № 3 в фарватере $3,2 \text{ м}^2/\text{с}$, западной $1 \text{ м}^2/\text{с}$, восточной $0,7 \text{ м}^2/\text{с}$. В экспедициях № 2 и № 4 выявлено аналогичное поведение потока вод. На рисунке, вверху справа представлено распределение модуля среднего по глубине вектора скорости течения вдоль разреза. В области фарватера наблюдается ярко выраженный максимум. Для экспедиции № 1 в фарватере скорость среднего течения достигала 53 см/с , западнее 40 см/с , восточной 32 см/с . Для экспедиции № 3 в фарватере 33 см/с , западнее 27 см/с , восточной 20 см/с . Для экспедиции № 1 максимальный горизонтальный градиент скорости течения достигает значений $0,0015 \text{ с}^{-1}$, соответствующее число Кибеля-Россби $Ki \approx 15$, что говорит о возможной баротропной неустойчивости потока. Распределение течений в соседних областях, однако, не выявляет последствий такой неустойчивости, что возможно связано со стабилизирующим действием берегов, или продукт неустойчивости лежит за пределами чувствительности ADCP. На рис.2, внизу справа, приведены направления осредненных по глубине течений. Характерным является наблюдаемое



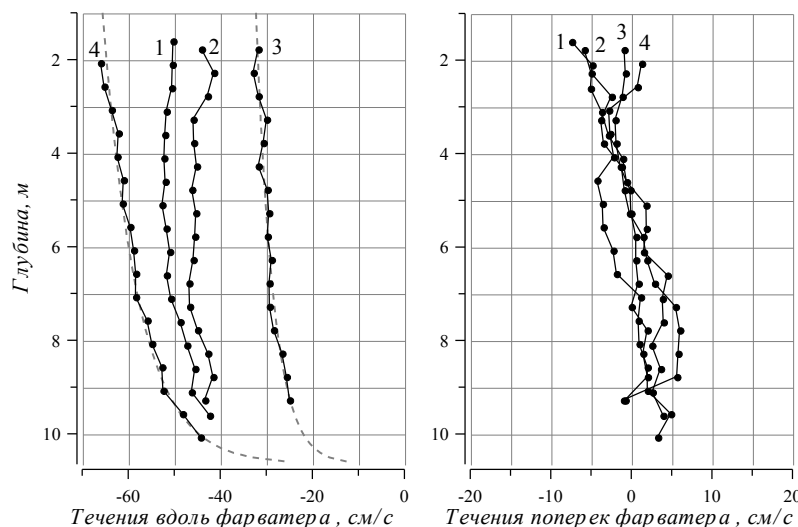
Р и с . 2 . Результаты измерений в северной узости Керченского пролива.

постоянство направления течения в области фарватера, которое составляет 242° от направления на север, что, возможно, соответствует направлению фарватера в данной точке разреза. За пределами фарватера, наблюдаемые течения значительно отклонены от направления продольной оси узоусти (45 или 225° от севера по часовой стрелке). Для экспедиции № 1 отклонение направления среднего течения за пределами фарватера от продольной оси составляет около 5° , для экспедиции № 3 – около 25° . Представленный в данном разделе материал наглядно демонстрирует характерные особенности горизонтального распределения поля скорости течений в северной узоусти для Азовского типа водообмена. Небезинтересным представляется, кратко обсудить характерные черты вертикального распределения течений в рассматриваемом районе пролива. Наблюдения показывают, что вертикальное распределение течений является почти плоскопараллельным, т.е. профили векторов скорости течений лежат в одной вертикальной плоскости. На рис.3 приведены примеры профилей компонент скорости течения на продольную и поперечную ось фарватера, полученные в самой глубокой точке разреза, цифры маркирующие черные линии – номера экспедиций.

Как можно видеть поперечная составляющая значительно меньше продольной, что говорит о выстраивании течения вдоль оси фарватера. Профили продольной составляющей позволяют экспериментально определить характерные для района параметры придонного слоя, что представляется важным для моделирования циркуляции в мелководном бассейне. Чаще всего вертикальный профиль скорости течений у дна оценивается логарифмическим соотношением [9]:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_b} \right), \quad (6)$$

где u_* – скорость придонного трения, k – постоянная Кармана (0,41), z – расстояние от дна, z_b – шероховатость дна. Пунктирными линиями на рисунке представлены логарифмические зависимости, подобранные для экспедиций



Р и с . 3 . Профили течений в северной узоусти Керченского пролива.

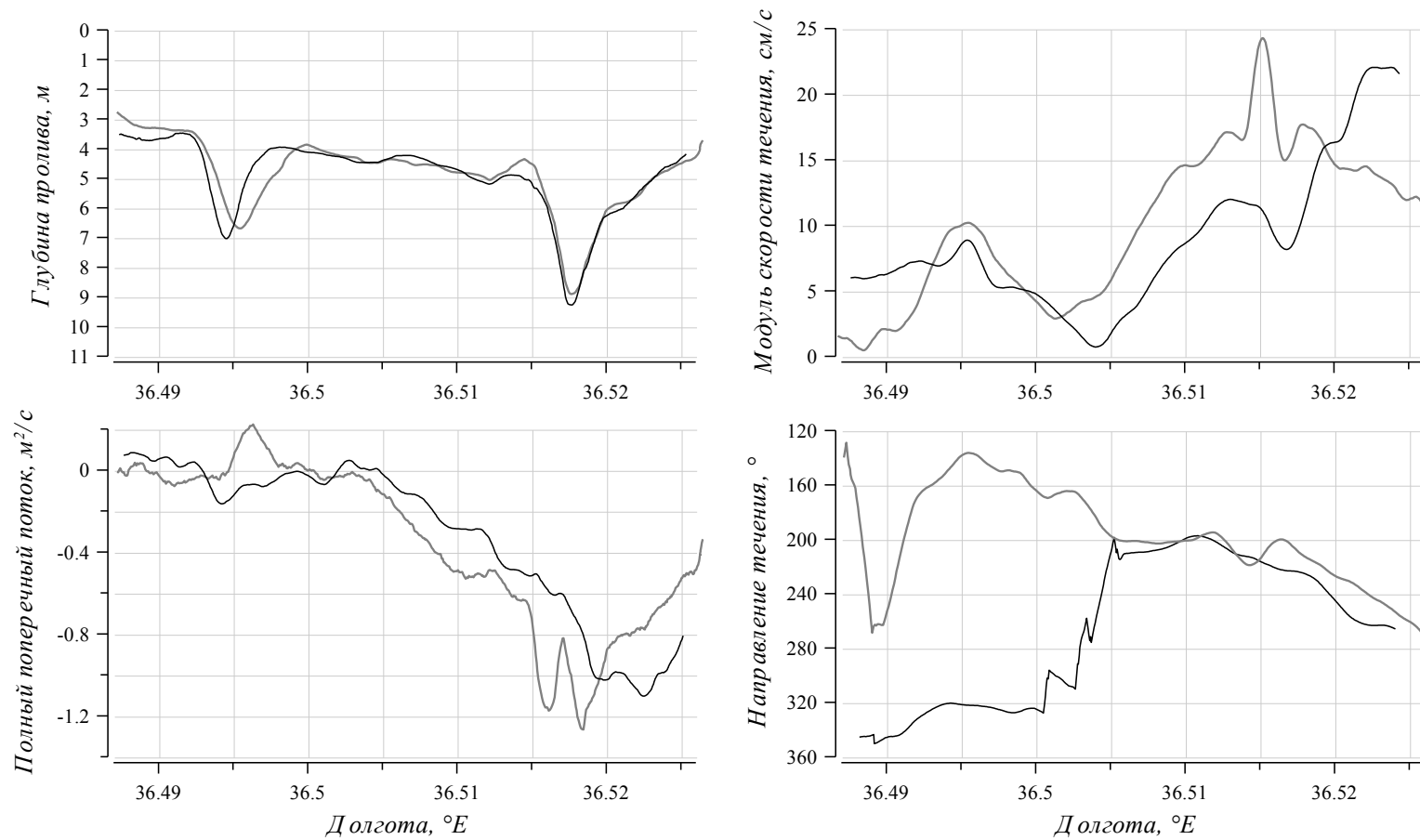
№ 3 и № 4. Характерная шероховатость дна для данного района составила 2 мм. Скорость придонного трения составила 1,56 и 3,17 см/с для экспедиций № 3 и № 4 соответственно. Коэффициент придонного трения составил 0,052. Как можно видеть профили экспедиций № 3 и № 4 достаточно хорошо аппроксимируются логарифмической зависимостью. Для экспедиций № 1 и № 2 такая аппроксимация представляется менее точной.

Выполненные в северной узости *in situ ADCP* измерения скорости течений однозначно выявляют наличие особенности их горизонтального распределения в области фарватера с характерными масштабами около 200 м. Подобие горизонтальных распределений течений, полученных в четырех экспедициях при азовском типе водообмена, создает предпосылки для улучшения существующего алгоритма оценки расхода по измерениям в отдельных точках разреза порт Крым – порт Кавказ.

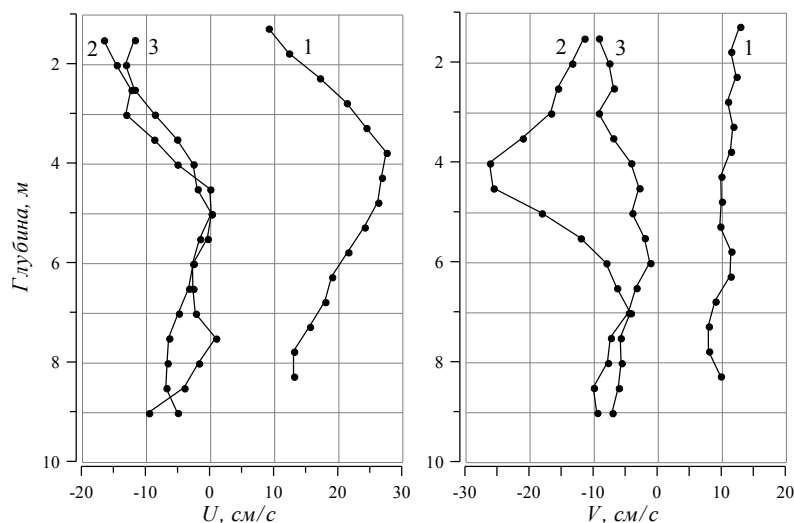
Центральная часть пролива с севера граничит с северной узостью, с юга ограничивается Павлоской узостью, с востока линией соединяющей южную оконечность косы Чушка с северной оконечностью острова Тузла. Средняя глубина пролива в центральной части составляет около 4 – 5 м. Однако строение рельефа дна имеет очень сложные особенности, представленные основным продольным фарватером и фарватером, соединяющим порт г. Керчь с основным фарватером, глубина которых превышает 8 м, при относительно небольших горизонтальных размерах около 200 – 300 м. На рис.4 приведены результаты измерений, выполненных на разрезе порт г. Керчь – северная оконечность о. Тузла, в экспедициях № 2 (серые линии, разрез А) и № 3 (черные линии, разрез А). На верхнем левом графике рисунка приведены распределения глубины пролива вдоль рассматриваемого разреза, которые наглядно демонстрируют особенности рельефа дна. Движение судна происходило параллельно (немного севернее) боковому фарватеру, глубина которого составляет около 7 м. На нижнем левом графике приведено распределение проекции потока на перпендикуляр к разрезу (64°). Можно видеть, что в восточной части разреза значения поперечного потока незначительны по отношению к наблюдениям в области пересечения фарватеров, где распределение достигают своего максимума по модулю. Отметим, что полученные распределения потоков для разных экспедиций оказались подобными для азовского типа водообмена, при этом значения модуля средних скоростей отличаются в большей мере (верхний правый график). Показательным является поведение направления течений, представленное на нижнем правом графике рисунка. В восточной части разреза направления отличаются на приблизительно 180°, что говорит о том, что течение стремится выравняться вдоль фарватера. В области пересечения фарватеров распределение течений имеет выраженный максимум.

На рис.5 приведены примеры вертикальных профилей восточной и северной компонент скорости течения, полученные в области пересечения фарватеров в ходе трех экспедиций.

Цифры, маркирующие линии, соответствуют номерам экспедиций. Как можно видеть профили имеют сложную структуру. В этом районе не наблюдается какой-либо закономерности вертикального строения поля течений от экспедиции к экспедиции. Единственное, что можно отметить – это



Р и с . 4 . Результаты измерений в центральной части Керченского пролива/

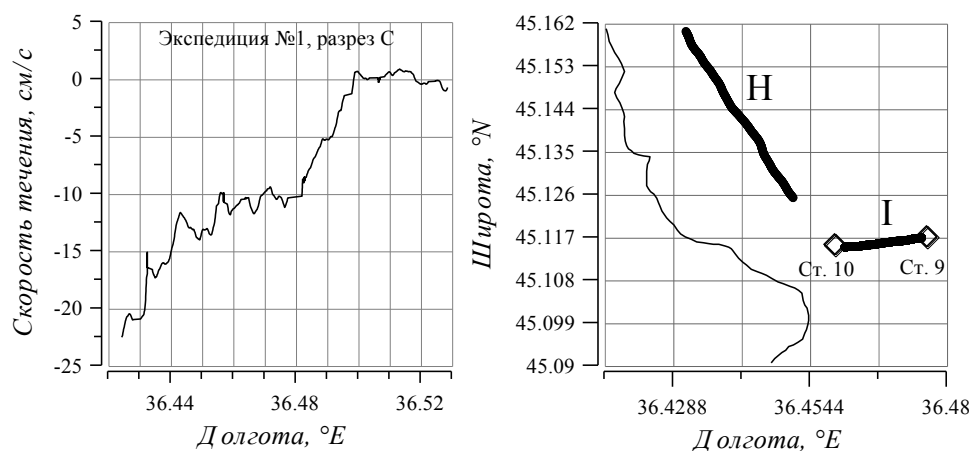


Р и с . 5 . Профили течений в центральной части Керченского пролива.

наблюдаемую особенность изменения скорости течений в слое от 3 до 6 м, который приблизительно соответствует глубине пролива за пределами фарватеров. Почти мгновенный профиль скорости течения представляет собой конкретную фазу эволюции поля течений, непрерывно меняющегося под действием постоянно изменяющихся внешних факторов, таких как, например, ветер. По этой причине нельзя однозначно определить, что формирует сложную вертикальную структуру течений в данном районе, временная изменчивость или взаимодействие стационарного течения со сложным рельефом дна. Приведенные профили течений выявляют значительные вертикальные сдвиги скорости, достигающие значений $0,1 \text{ с}^{-1}$, что в условиях слабой стратификации ($N = 0,03 \text{ рад/с}$), наблюдаемой в районе, может приводить к возникновению сдвиговой гидродинамической неустойчивости ($Ri \approx 0,1$) и, как следствие, к повышенному вертикальному перемешиванию.

В рассмотренных районах Керченского пролива воды характеризуются слабой стратификацией, вызываемой в основном дневным прогревом приповерхностного слоя моря, и динамика может рассматриваться в приближении однородной жидкости. Ситуация со стратификацией значительно изменяется в южной части пролива где распресненные азовские воды вступают во взаимодействие с более солеными водами Черного моря.

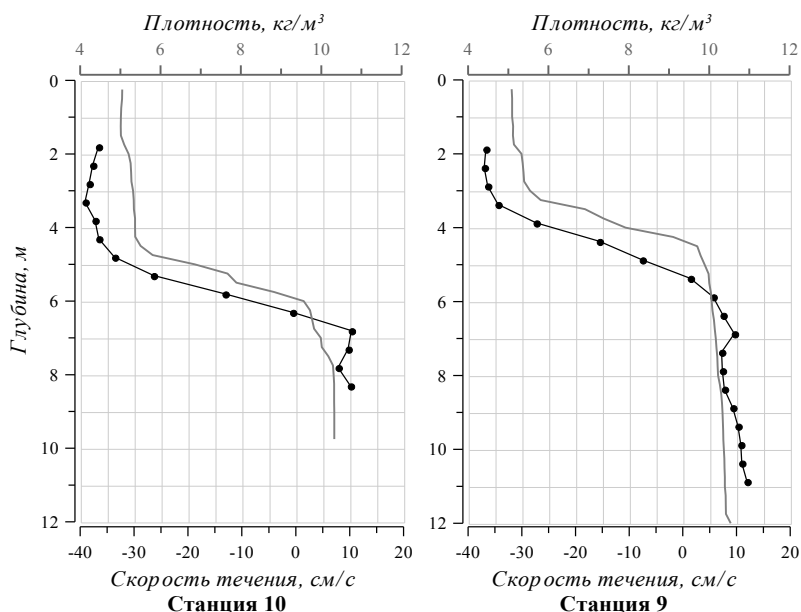
Южная часть пролива – от Павловской узости на юг до выхода в Черное море. Протяженность этой части пролива составляет около 20 км, при ширине около 16 км, южнее разреза А экспедиции № 5 (рис.1) рельеф дна не имеет мелкомасштабных особенностей искусственного происхождения. По мере продвижения на юг глубина моря плавно возрастает (около $0,3 \text{ м/км}$). Измерения в наиболее южной части пролива выполнялись только в экспедиции № 1 (24 июля 2008 г.). Измерения проходили накануне (или в процессе) смены типа течений в проливе: во второй половине дня 24 июня наблюдался азовский тип водообмена (разрезы С – F); ранним утром 25 июня на разрезе G зарегистрирован черноморский тип (табл.1). В левой части рис.6 приведено распределение северной компоненты средней по глубине скорос-



Р и с . 6 . Течения (слева) и расположение разрезов (справа).

ти течения вдоль разреза С. На рисунке ярко выделяется вдольбереговое течение южного направления, со скоростями от 10 до 20 см/с и шириной около 6 км, прижатое к западному берегу. В данном разделе представлены данные, полученные на самых южных разрезах экспедиции № 1, которые не вошли в сводную табл.1. Расположение разрезов *H* и *I* экспедиции № 1 относительно береговой линии представлено в правой части рис.6.

Полыми квадратами обозначены места выполнения гидрологических станций. На рис.7 приведены профили условной плотности (серые линии, верхняя шкала) и проекции скорости (черные линии, нижняя шкала) на основное направление течения (-30°), полученные на гидрологических ст.9 и 10 соответственно (профили скорости течения представлены со сдвигом 0,5 м по глубине). Профили плотности имеют ярко выраженную двухлопную струк-



Р и с . 7 . Профили течений и плотности в южной части пролива.

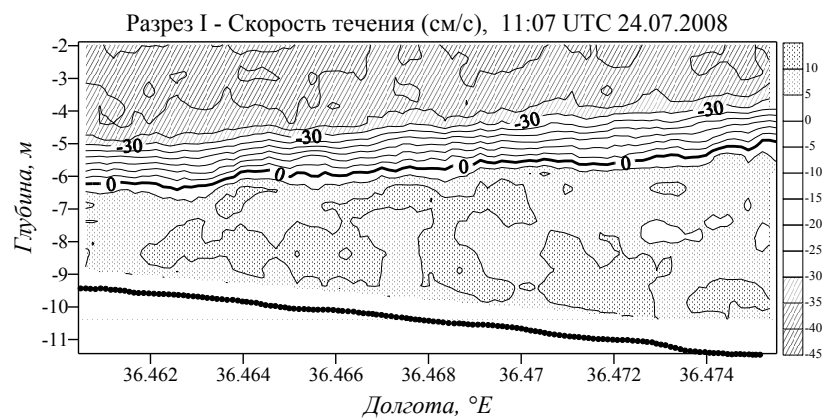
туру: верхний слой сформирован распресненными водами, вытекающими из Азовского моря; нижний – черноморскими водами верхнего однородного перемешанного слоя (глубина залегания сезонного пикноклина в Черном море около 15 – 20 м). Слой скачка плотности или пикноклин, имеет характерный размер по вертикали около 1 м, частота плавучести достигает 0,18 рад/с, или 100 цикл/час. Профили скорости течения, также, имеют ярко выраженную двухслойную структуру, с границей раздела в слое пикноклина.

В верхнем слое значения скорости течения по модулю достигают 35 см/с, в нижнем слое наблюдается противотечение со средней скоростью около 10 см/с. Вертикальный сдвиг в слое скачка достигает огромных значений $0,25 \text{ с}^{-1}$, несмотря на то, что при измерении профиля скорости осуществляется пространственное осреднение по вертикали, присущее *ADCP*. Острый пикноклин блокирует обмен водами между верхним и нижним слоями, число Ричардсона в пикноклине 0,5. В целом вертикальное распределение течений повторяет распределение плотности. На рис.8 приведено пространственное распределение проекции скорости течения на основную ось (-30°), полученное на поперечном берегу разрезе *I* (рис.6). Как можно видеть по мере отдаления от берега толщина верхнего слоя уменьшается со средней скоростью 1,18 м/км, при этом ширина слоя скачка остается почти постоянной и составляет около 1 м. Хотя число Ричардсона достаточно мало и не исключается возможность развития бароклинной неустойчивости, тем не менее, на графике не наблюдается проявления волновых движений. Наибольшая пространственная изменчивость в южной части была обнаружена на разрезе *H*, общая протяженность которого около 10 км. На рис.9 вверху представлен фрагмент пространственного распределения вдольбереговой компоненты скорости течения (-20°) в области переднего фронта нижнего противотечения. Протяженность фрагмента около 4 км, по глубине выделен слой скачка скорости (плотности) шириной 2 м. На рисунке ярко проявляется область с волнообразным поведением изолиний распределения.

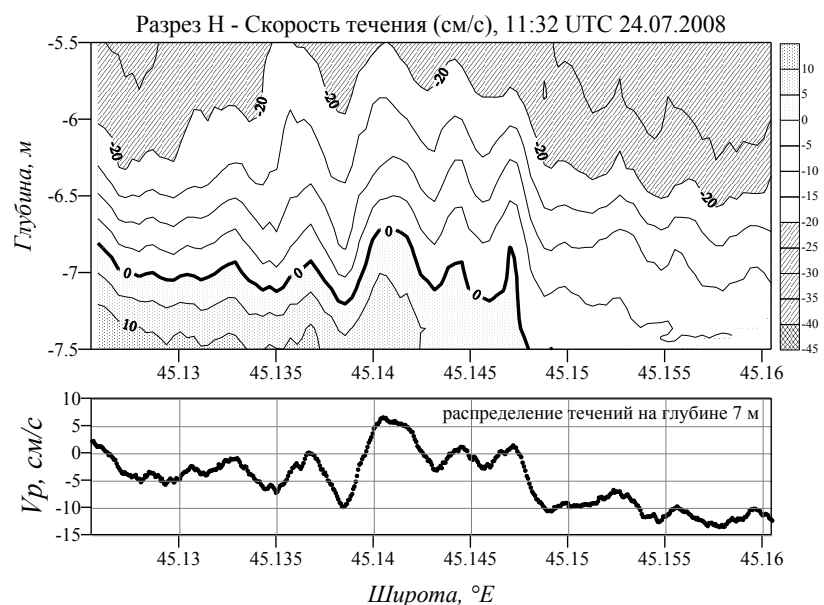
Характерные размеры неоднородностей (длин волн) изменяются от 370 (справа) до 480 (слева) м. Максимальный размах изменчивости скорости наблюдается на глубине 7 м и составляет 15 см/с (на рисунке внизу). Вертикальный размах положения изолиний достигает 0,5 м. Приведенное распределение наглядно демонстрирует сложность динамических процессов, происходящих во время перестройки типов водообмена между морями на фронтальных разделах. Возможно, наблюдаемая короткопериодная изменчивость присоединена к переднему фронту развивающегося придонного противотечения, и перемещается вместе с ним в северном направлении со средней скоростью около 10 см/с.

В процессе выполнения экспедиционных работ отработаны методические аспекты использования *ADCP* на ходу судна, которые частично освещены в тексте. Создано программное обеспечение для обработки данных, учитывающее нюансы, выявленные в процессе работы. Показано, что прибор может эффективно использоваться для измерения распределения течений в водоемах с глубиной от 3 до 15 м.

В северной и центральной части Керченского пролива мелкомасштабные особенности рельефа дна в виде фарватеров оказывают значительное влияние



Р и с . 8 . Распределение течений в южной части пролива.



Р и с . 9 . Распределение течений во фронтальной зоне.

на пространственное распределение течений. В южной части пролива динамика вод усложняется в результате двухслойности плотностной структуры, образованной водами Азовского и Черного морей.

Работа выполнена в рамках Национального проекта «Управление».

Авторы выражают глубокую признательность участникам экспедиций, оказавшим неоценимую помощь при проведении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтман Э.Н. Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // Океанология. – 1970. – т.Х, № 3. – С.438-447.
2. Альтман Э.Н. Исследование водообмена между Черным и Азовскими морями // Сб. работ ЛЮМ ГОИН. – 1972. – т.10, вып.11. – С.3-47.

3. *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.
4. *Тучковенко Ю.С.* Численная математическая 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.
5. *Иванов В.А., Шапиро 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.
6. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Совместное моделирование течений и ветрового волнения в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал.– 2007.– № 5.– С.3-20.
7. *Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Последствия загрязнения Керченского пролива и предпроливных зон в результате шторма 11 – 12 ноября 2007 года // Доп. НАН України.– 2009.– № 1.– С.177-180.
8. *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.
9. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.
10. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Достоинства и недостатки акустических доплеровских профилометров течений как средства диагностики тонкой пространственной структуры течений // Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова.– 2009.– С.79-98.

Материал поступил в редакцию 1.11.2010 г.