

УДК 551.465

Л.А.Петренко

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ И ДАННЫХ ADCP-НАБЛЮДЕНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ**

Проведен сравнительный анализ результатов модельных расчетов течений в Керченском проливе с данными ADCP-наблюдений в 2008-2009 гг. Получено хорошее совпадение картины рассчитанных течений и данных наблюдений. Определена степень влияния разности уровней предпроливных зон на формирование поля течений в проливе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *моделирование, течения, Керченский пролив, уровень моря.*

Исследования Керченского пролива продолжают оставаться актуальными, несмотря на большое количество работ, посвященных этому вопросу [1 - 5].

В последние годы были проведены измерения скорости течений в Керченском проливе с помощью акустического доплеровского профиломера течений (ADCP) [1, 2]. В связи с этим появилась возможность сравнить результаты моделирования динамики пролива с данными непосредственных измерений.

В данной работе для расчета течений в Керченском проливе использовалась стационарная модель, предложенная в [2].

Исходные данные. В работе использовались следующие данные:

- осредненные по глубине данные ADCP-наблюдений за течениями, полученные в пяти экспедициях, выполненных в Керченском проливе в 2008 – 2009 гг. [1]. Измерения осуществлялись с борта судна вдоль пути следования. Дискретность измерений по глубине составляла 0,5 м, дискретность по времени 0,3 с. Измерения скорости течения проводились вдоль разрезов, выполненных поперек пролива в северной узости, в центральной и южной частях пролива (рис.1);

- данные спутниковых альтиметрических измерений, обработанные в рамках проекта AVISO [3] и представляющие собой карты распределения аномалий уровня поверхности моря, осредненные за 7 сут;

- спутниковые данные QuikScat о среднесуточной скорости ветра над регионом для дат, соответствующих дням проведения ADCP-съемок;

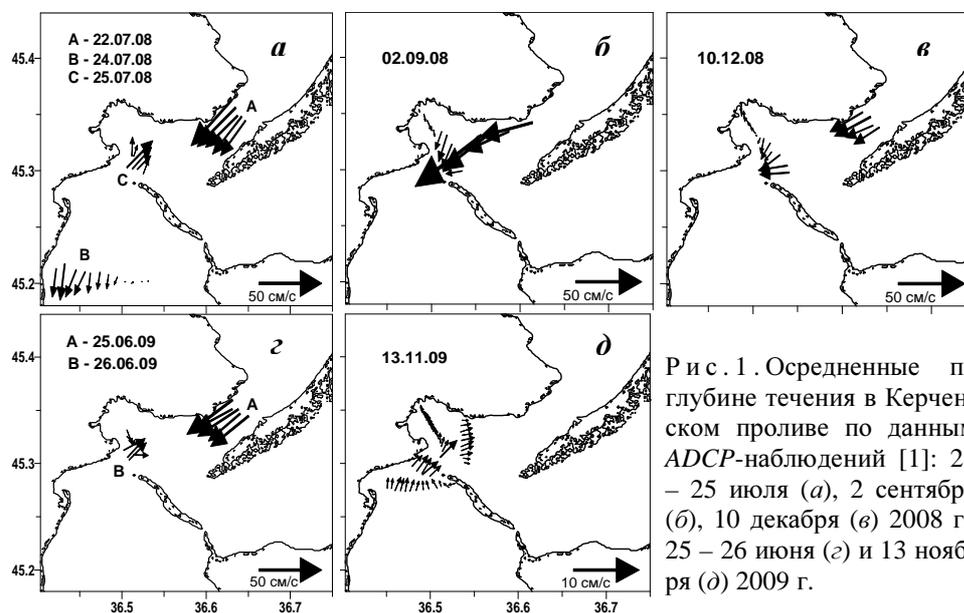
- модельные поля течений в проливе, полученные на основе стационарной модели, предложенной в [2].

Используемая модель. Для расчета течений в Керченском проливе использовалась стационарная модель, основанная на линейной теории установившихся течений в однородной жидкости без горизонтального обмена количеством движения, обобщенная на случай учета внутреннего трения, пропорционального скорости течения.

Уравнения модели имеют вид:

$$-fv = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - ru, \quad fu = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - rv, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

© Л.А.Петренко, 2012



Р и с . 1 . Осредненные по глубине течения в Керченском проливе по данным ADCP-наблюдений [1]: 22 – 25 июля (а), 2 сентября (б), 10 декабря (в) 2008 г., 25 – 26 июня (г) и 13 ноября (д) 2009 г.

где f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; A – коэффициент вертикальной вязкости; r – коэффициент рэлеевского трения; ζ – уровень.

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, касательное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской воде, так что

$$A \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau^x, \quad A \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau^y, \quad w = 0 \quad \text{при} \quad z = 0, \quad (2)$$

где τ^x , τ^y – составляющие касательного напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды.

На дне принимается условие прилипания

$$u = v = w = 0 \quad \text{при} \quad z = H. \quad (3)$$

Интегрирование уравнения неразрывности по вертикали от поверхности моря до дна с учетом граничных условий (2), (3) приводит к интегральному уравнению неразрывности

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

Что позволяет ввести интегральную функцию тока ψ . Составляющие полного потока U , V , и функция тока ψ определяются формулами

$$U = \int_0^H u dz = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V = \int_0^H v dz = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (5)$$

На твердых боковых границах бассейна ставится условие непротекания, т.е. равенство нулю нормальной к границе компоненты полного потока. На открытых границах ставится условие свободного протекания, а именно, равенство нулю касательного к границе компоненты полного потока (полный поток направлен по нормали к границе).

Решение трехмерной задачи сводится к решению двумерного эллиптического уравнения для интегральной функции тока и к последующему вычислению всех трех компонент скорости течения и градиента уровня по аналитическим формулам. Водообмен между Черным и Азовским морями оценивается по соотношению, связывающему его интенсивность со скоростью и направлением ветра.

Гидрометеорологическая ситуация при проведении ADCP-наблюдений. Во время проведения 1-й съемки 22 - 23 июля 2008 г. в районе Керченского пролива наблюдался ветер северо-восточного направления со скоростью до 7 м/с. Вдоль пролива сила ветра изменялась от 7 м/с на северной границе до 4 м/с на южной.

Над акваторией Азовского моря в это время господствовал более сильный северо-восточный ветер, который, естественно, вызвал подъем уровня у южного берега моря, т.е. на северной границе пролива. Предпроливная зона Черного моря находилась под действием слабого ветра со скоростью до 2 м/с, плавно меняющего направление от восточного (22 июля) к северо-восточному (24 июля). 24 июля северо-восточный ветер над Азовским морем ослаб до 4 м/с. 25 июля ситуация резко изменилась и над всем регионом уже действовал ветер южного направления со скоростью до 5 м/с.

Действующий над регионом в течение нескольких суток северо-восточный ветер сформировал перепад уровня, обусловивший азовский поток в проливе (рис.1, а).

По данным спутниковых альтиметрических наблюдений во время 1-й съемки в Азовском море имело место возвышение уровня в центральной части моря и у северной границы пролива. Осредненный за 7 суток перепад уровня между азовской и черноморской предпроливными зонами составлял 3 см (рис.2, а).

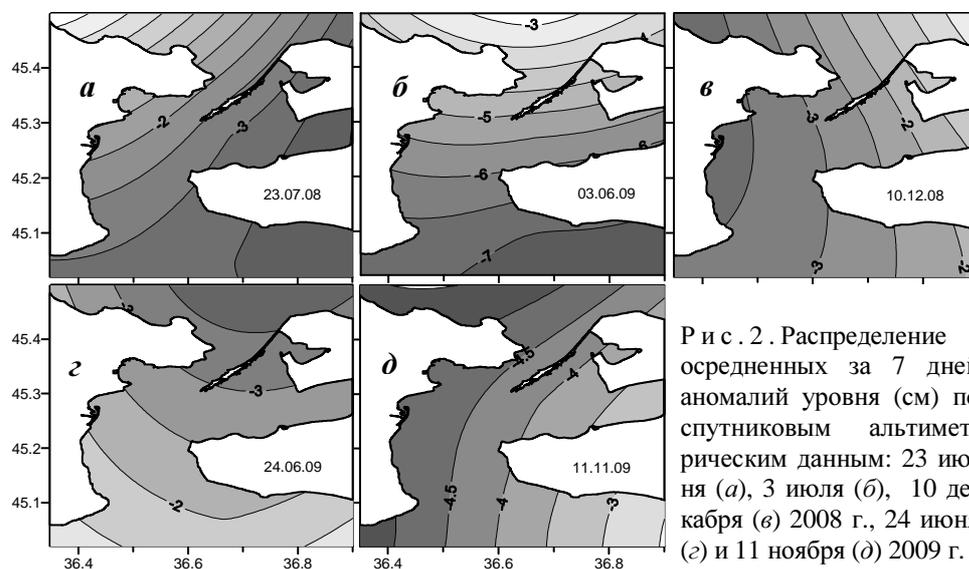
2-я съемка проводилась 2 сентября 2008 г. (рис.1, б) при однородном северо-восточном ветре со скоростью до 7 м/с как в проливе, так и в предпроливных зонах. В Азовском море наблюдалось вызванное ветром повышение уровня в южной части моря с максимумом в предпроливной зоне. Перепад уровня составлял 2,5 см (рис.2, б).

При проведении 10 декабря 2008 г. 3-й съемки (рис.1, в) рассматриваемый регион находился под действием северо-западного ветра со скоростью 8 – 9 м/с. На северной границе пролива уровень был выше на 2 см, чем на южной (рис.2, в).

4-я съемка в Керченском проливе проводилась 25 и 26 июня 2009 г. (рис.1, г). В период этой съемки произошла резкая смена направления действия ветра в регионе с юго-восточного на северо-западное при умеренных скоростях ветра 4 – 5 м/с.

25 июня над проливом имела место зона конвергенции ветра: над Азовским морем господствовал умеренный северо-восточный ветер со скоростью 5 – 6 м/с, а над черноморским предпроливьем наблюдался юго-восточный ветер со скоростью около 4 м/с. Над самим же проливом ветер имел направление восток-юго-восток и скорость 4 м/с.

26 июня во время проведения съемки над всем рассматриваемым регионом действовал северо-западный ветер со скоростью до 5 м/с.



Р и с . 2 . Распределение осредненных за 7 дней аномалий уровня (см) по спутниковым альтиметрическим данным: 23 июня (а), 3 июля (б), 10 декабря (в) 2008 г., 24 июня (з) и 11 ноября (д) 2009 г.

До смены направления ветра в центральной части Азовского моря отмечалось значительное понижение уровня с локальным минимумом в предпроливной зоне как следствие действия продолжительного (несколько суток) южного ветра. Черноморская предпроливная зона все это время находилась под действием слабого (до 3 м/с) юго-восточного ветра. По направлению к Черному морю уровень вдоль пролива повышался. Разность уровней на концах пролива составляла на момент проведения съемки 2 см. (рис.2, з). Следует отметить, что только при проведении 4-й съемки уровень в черноморском предпроливье превышал уровень юга Азовского моря.

5-й съемке, которая проводилась 13 ноября 2009 г. (рис.1, д), предшествовал (12 ноября) штормовой южный ветер над Азовским морем со скоростью до 14 м/с. В течение суток максимум скорости ветра значительно сместился к югу, а над рассматриваемым районом на момент съемки 13 ноября действовал северо-западный ветер со скоростью 10 – 11 м/с. Уклона уровня вдоль пролива не наблюдалось (рис.2, д).

Сопоставление модельных расчетов и данных ADCP-наблюдений.

Модельные расчеты осредненных по глубине векторов скоростей течений в Керченском проливе были проведены для дат ADCP-съемок с заданием среднесуточного ветра, действующего над регионом. Численные эксперименты проводились на равномерной сетке с шагом $\Delta x = \Delta y = 50$ м. Фоновый перенос Q задавался как функция разности уровней в предпроливных зонах.

Результаты расчетов показали, что модель хорошо воспроизводит картину течений в проливе. Полученные направления и скорости осредненных по глубине течений хорошо согласуются с реально наблюдаемыми. Интенсификация течений проявляется в северной узости, в Павловской узости и в промоине у южной оконечности о.Коса Тузла, что объясняется уменьшением ширины и глубины пролива в этих областях, а также на мелководье с наветренной стороны. В южной части пролива течения прижимаются к западному берегу при ветрах северных румбов. Модельные поля течений (см/с) и вектор скорости ветра (м/с) приведены на рис.3.

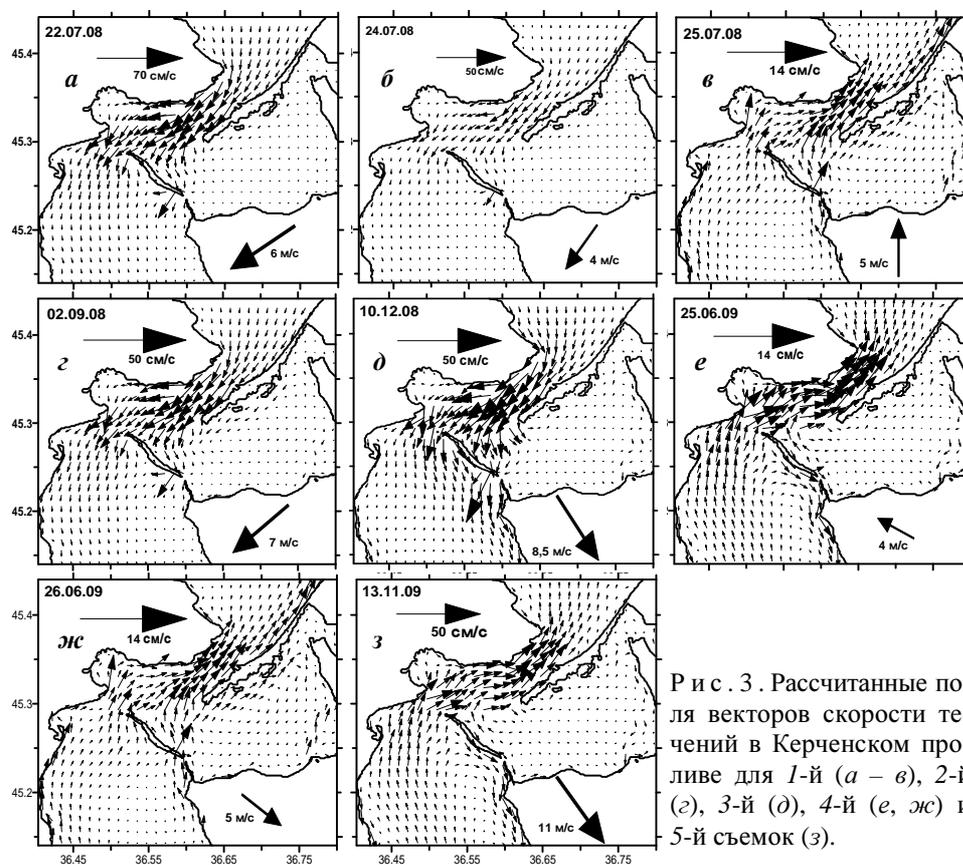


Рис. 3. Рассчитанные поля векторов скорости течений в Керченском проливе для 1-й (а – в), 2-й (з), 3-й (д), 4-й (е, ж) и 5-й съемки (з).

22 – 23 июля 2008 г. при северо-западном ветре модельные расчеты показали азовский поток со скоростью до 45 см/с. Фоновый поток задавался $Q = -3000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Достаточно сильное течение в проливе 22 и 23 июля и ослабление ветра 24 июля привели к уменьшению разности уровней в предпроливных зонах (о чем свидетельствуют альтиметрические данные) и, как следствие, к ослаблению переноса на юг, в сторону Черного моря (рис.3, а, б). Поэтому после смены ветра 25 июля на южный со скоростью до 5 м/с и при отсутствии уклона уровня вдоль пролива также изменилось и направление течения. По результатам расчетов в проливе 25 июля имел место черноморский поток со скоростью течений до 14 см/с. При южном ветре интенсификация течений произошла также с обеих сторон косы Чушка и далее вдоль восточного берега пролива (рис.3, в).

В результате действия северо-восточного ветра над Азовским морем накануне и в момент проведения 2-й съемки у северной границы пролива образовался нагон (рис.2, з). Поэтому поле ветра 2 сентября 2008 г. и градиент уровня вдоль пролива обусловили азовский тип переноса (рис.1, б) с максимумом скорости течения до 45 см/с, что и отображали модельные расчеты (рис.3, з) при $Q = -3000 \text{ м}^3/\text{с}$.

По данным ADCP-наблюдений 10 декабря 2008 г. (3-я съемка) в проливе при северо-западном ветре поток был направлен из Азовского моря в

Черное со скоростью течения до 20 см/с. Этому способствовал и сформировавшийся ранее и еще не выровненный перепад уровня предпроливных зон (уровень на северной границе превышал черноморский на 3 см). При задании $Q = -3000 \text{ м}^3/\text{с}$ модель правильно воспроизвела азовский поток в проливе 10 декабря со скоростями до 25 см/с (рис.3, д).

4-я съемка, как и 1-я, характерна резкой сменой направления действия ветра. Юго-восточный ветер 25 июня 2009 г. сменился 26 июня на северо-западный. Скорость ветра при этом существенно не изменилась и составляла 4 – 5 м/с. По данным ADCP-наблюдений 25 июня имел место азовский перенос со скоростью течений до 65 см/с, который сменился 26 июня черноморским со скоростью до 25 см/с.

Обращает на себя внимание факт направленности переноса из Азовского моря в Черное при юго-восточном ветре. В [4] при исследовании течений Керченского пролива по спутниковым снимкам также отмечались случаи несовпадения направления переноса с направлением действия достаточно сильного ветра и был сделан вывод, что основной вклад в формирование течений вносят сгонно-нагонные колебания уровня. Данные ADCP-наблюдений и результаты модельных расчетов предоставляют возможность разобраться в этом вопросе более подробно.

24 июня 2009 г. над южной частью Азовского моря действовал сильный северо-восточный ветер со скоростью до 10 м/с, который вызвал азовский перенос при малой разнице уровней на границах пролива (рис.2, з). Поэтому 25 июня при юго-восточном ветре все еще наблюдалось остаточное течение из Азовского моря в Черное. Но сформированный ранее уклон уровня обусловил уже в последующие сутки перенос из Черного моря в Азовское. Слабый северо-западный ветер 26 июня в рассматриваемом регионе был непродолжительным и не смог оказать существенного влияния на направление переноса в проливе из Черного моря в Азовское, обусловленного уклоном уровневой поверхности.

Анализ ветровой обстановки показал, что над рассматриваемым регионом в последних числах июня 2009 г. преобладали ветры восточных и южных румбов, которые стали причиной понижения уровня в центральной части Азовского моря (рис.4). Отрицательная аномалия уровня поверхности моря углубляясь, продолжала существовать до середины июля 2009 г. и поддерживать уклон уровня, способствующий интенсивному черноморскому переносу.

Модельные расчеты правильно отразили направленность переноса в проливе при переменном ветре: азовский поток 25 июня со скоростью течений до 45 см/с (рис.3, а) и черноморский перенос 26 июня со скоростью течений до 25 см/с (рис.3, в).

Фоновый поток задавался $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$.

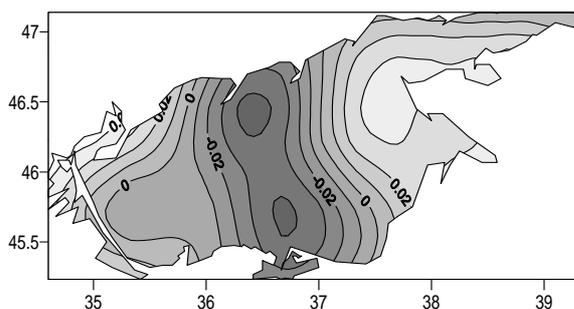


Рис. 4. Распределение осредненных за 7 дней аномалий уровня (см) в Азовском море 24 июня 2009 г. по спутниковым альтиметрическим данным.

5-я съемка проводилась в проливе 13 ноября 2009 г. после шторма в Азовском море 12 ноября. Скорость юго-западного ветра над акваторией моря достигала 13 – 14 м/с. Но к моменту съемки зона максимальной силы ветра сместилась к югу на Черное море, а над Керченским проливом ветер сменился на северо-западный со скоростью 9 – 11 м/с. 12 и 13 ноября в проливе имел место черноморский поток со скоростью течений до 41 см/с. Очевидно, что течения, измеренные 13 ноября, были вызваны действием сильного юго-западного ветра в предыдущие сутки, так как уклона уровня между предпроливными зонами не наблюдалось. Сгенерированное влекущим действием сильного ветра интенсивное поле течений еще не успело отреагировать на изменение направления ветра, а сгонно-нагонные отклонения уровня моря только вошли в стадию формирования.

При задании фонового потока $Q = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$ модельные скорости течений в проливе достигали 35 - 40 см/с. При северо-западном ветре и черноморском типе потока отмечено формирование ветви интенсивного юго-восточного течения вдоль о.Коса Тузла и далее вдоль восточной границы пролива (рис.3, з). При этом у южной оконечности о.Коса Тузла через промоину перенос минимален. Основной перенос черноморской воды осуществляется через Павловскую узость.

Выводы. Используемая в работе стационарная модель динамики Керченского пролива адекватно воспроизводит поле течений, что подтверждается сопоставлением результатов расчетов с наблюдениями. Для этого необходимо учитывать перепад уровня на концах пролива, осредненный за несколько суток, корректируя величину фонового потока Q .

Изменения уровня моря на северной и южной границах пролива обуславливаются в меньшей степени особенностями колебаний уровней Азовского и Черного морей и в большей степени сгонно-нагонными эффектами в зависимости от силы, направления и длительности действия ветра. Используемые в работе спутниковые альтиметрические данные о распределении осредненных за 7 суток аномалий уровня в исследуемом районе дают заниженные оценки перепада уровня на концах пролива. Но такое осреднение исключает колебания уровня с небольшими периодами и в морях, и собственно в проливе. Поэтому качественно они достоверно отражают эффект влияния разности уровней между предпроливными зонами морей на динамику вод.

Съемки, проводимые в июне, июле, августе, совпадают с периодом наименьших колебаний уровня моря в Керченском проливе, в сентябре, ноябре, декабре колебания несколько заметнее [5]. К тому же ADCP-наблюдения в проливе проводились в основном при слабом и умеренном ветре, кроме 5-й съемки. Все это позволило более четко оценить вклад разности уровней предпроливных зон в процесс формирования течений в проливе. Особенно наглядными являются ситуации с резкой сменой направления действия ветра.

В случае, когда смена направления ветра совпадает с завершающей стадией формирования сгонно-нагонного уклона уровня, обусловленного действием продолжительных ветров в предыдущий интервал времени, то поток в проливе меняет свое направление и совпадает с ветром даже после смены направления действия ветра (1-я съемка).

В другом случае непродолжительное изменение направления ветра не может оказать какое-либо влияние на направленность переноса, так как поле течений в проливе обусловлено сформированным ранее уклоном уровня вдоль пролива (4-я съемка).

Таким образом, направленность переноса в Керченском проливе в большей степени зависит от разности уровней в предпроливных районах, которая создается за предшествующий наблюдениям промежуток времени действия устойчивых ветров. Кратковременные изменения направления ветра не оказывают влияния на процесс формирования сгонов-нагонов на концах пролива. При модельных расчетах следует учитывать перепад уровня на границах пролива, корректируя величину фонового потока Q . При задании дополнительного фонового переноса в $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ с соответствующим знаком на 1 см разницы уровней в предпроливных областях достигается адекватная наблюденной картина течений в проливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А., Шутов С.А., Зима В.В. Течения в Керченском проливе по данным ADCP-наблюдений 2008 – 2009 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.- Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.- вып.22.– С.253-267.
2. 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.
3. <ftp://ftp.avisioceanobs.com/>
4. Щербак С.С., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лаврова Н.П. и др.– М.: Азбука-2000, 2007.– вып.4, т.1.– С.376-383.
5. Еремеев В.Н., Иванов В.А., Ильин Ю.П. Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морський екологічний журнал.– 2003. - № 3, т.2.– С.25-35.

Материал поступил в редакцию 16.01.2012 г.

АНОТАЦІЯ. Проведено порівняльний аналіз результатів модельних розрахунків течій в Керченській протоці з даними ADCP-спостережень у 2008 – 2009 рр. Отримано добрий збіг картини розрахованих течій і даних спостережень. Визначено ступінь впливу різниці рівнів передпротокових зон на формування поля течій в протоці.

ABSTRACT. Comparative analysis of the results of current model calculations in the Kerch Strait with the data ADCP-observations in 2008 – 2009 was carried out. A good coincidence of the calculated current pattern and observational data was obtained. It was determined the degree of influence of the difference of nearstrait zone levels on the current field formation in the strait.