

УДК 551.465

**А.А. Чепыженко, вед. инженер,**

**А.И. Чепыженко, науч. сотр., канд. техн. наук,**

**В.М. Кушнир, профессор, д-р техн. наук**

*Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины*

*ул. Капитанская, 2, г. Севастополь, Украина, 99011*

*E-mail: annacher87@yandex.ru, ecodevice@yandex.ru, kushnirv@yahoo.com*

## **НОВЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ И КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ**

*Рассмотрены возможности и результаты применения комплексной автоматизированной системы сбора данных, содержащей гидрофизический зонд «Кондор», акустический доплеровский измеритель течений и космические съемки оптическими сканерами системы MODIS. Показана эффективность этой системы для изучения структуры вод Керченского пролива*

**Ключевые слова:** *автоматизированный гидрофизический зонд, акустический измеритель параметров течений, суммарное взвешенное вещество, хлорофилл-а, сканер цвета системы MODIS.*

**Введение.** Керченский пролив является важнейшей транспортной магистралью между портами Азовского и Черного морей с выходом в Мировой океан, это также зона рыболовства, рекреации, гидротехнического строительства, освоения энергетических ресурсов. По этим и другим причинам океанологическим исследованиям Керченского пролива посвящено большое число работ, начиная с конца XIX – начала XX столетий.

Поверхность морского дна в Керченском проливе представлена в основном слабонесущим грунтом (песок, жидкий ил), и при этом возможны значительные скорости постоянных и волновых придонных течений. При взаимодействии этих течений с поверхностью дна формируются сложные поля скорости и давления в виде вихре-волновых структур и мелкомасштабной турбулентности. При определенных условиях эти поля воздействуют на донный материал таким образом, что он начинает перемещаться вдоль поверхности дна и подниматься вверх, формируя профили взвешенных наносов. Эти процессы приводят к изменению структуры дна, которые существенно изменяют поля естественных течений, температуры и других параметров морской среды. Другим следствием этих процессов является повышенная концентрация взвеси, что оказывает сильное влияние на оптические характеристики водной среды пролива и фотосинтетические процессы, которые проявляются в изменениях концентрации хлорофилла-а. Концентрация взвеси и хлорофилла-а, а также температура и соленость Керченского пролива связаны между собой и с полем течений как элементы единой экосистемы. Изучение этих связей является актуальной проблемой для понимания основных механизмов формирования водной среды пролива и характеристик водообмена между Азовским и Черным морями. Для решения этой проблемы в настоящее время появились новые возможности, связанные с созданием автоматизированных измерительных средств и развитием методов обработки космических съемок для количественных оценок концентрации взвеси и хлорофилла-а.

Основной целью настоящей работы является обоснование возможностей использования этих методов для изучения структуры вод Керченского пролива в комплексной экспедиции, выполненной Морским гидрофизическим институтом (МГИ) и Южным научным центром Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в сентябре 2011 г. [1].

**1. Средства контактных измерений.** В последние годы в МГИ НАНУ были разработаны несколько модификаций малогабаритных STD зондов со встроенной памятью, что позволяет использовать их с маломерных судов, без специальных лебедок. Некоторые такие приборы оснащены датчиками дополнительных параметров, что расширяет функциональные возможности таких систем при выполнении различных специализированных проектов. Один из таких приборов, зонд «Кондор», широко используется для выполнения исследований Керченского пролива и прибрежной зоны Крыма [2].

Внешний вид зонда «Кондор» изображен на рисунке 1. Он предназначен для оперативных исследований биофизических и гидрологических свойств вод прибрежной зоны моря.



Рисунок 1 – Гидрофизический зонд «Кондор»

В портативном зонде «Кондор» наряду с традиционным СТД - каналами и измерителем течений были включены оптические каналы показателя ослабления света (ПОС) в трех диапазонах видимого спектра: сине-фиолетовом (405 нм), зеленом (532 нм) и красном (660 нм). Дискретность измерений по глубине составляет 10 см, частота измерений – 15 Гц. Основные характеристики измерительных каналов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики гидрофизического зонда «Кондор»

Характеристики измерительных каналов зонда «Кондор»	Диапазон измерения	Цена единицы наименьшего разряда	Суммарная погрешность измерения
Температура, °С	-2...35	0,02	± 0,1
Электропроводность, отн.ед. (мСим/см)			
– 1-й диапазон	от 0 до 0,9(42)	$2,44 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$
– 2-й диапазон	от 0,62(26,6) до 1,6(69)	(0,0105)	(0,04)
Гидростатическое давление, МПа (глубина погружения, м)	0...1 до 100	0,001 0,1	± 0,003
Показатель ослабления света (ПОС), м <sup>-1</sup> на длинах волн 405, 532 и 660 нм	0,01...2	0,002	±0,005
Квантовая облученность, mkEinsteins/m2.sec	0,002...2000	0,001	± 10%
Скорость течения, см/сек	0,2...100	0,05	0,15
Направление течения, град	0...360	0,5	2

Прибор применяется в двух вариантах: кабельном и автономном, при котором данные сохраняются на флеш-памяти, расположенной в корпусе зондируемого прибора. Достоинством автономного варианта является возможность применения электрической мини-лебедки типа ЛГЭ и кевларовой нити-троса, позволяющих осуществлять зондирование до глубин 120...150 м со скоростью до 100 м/мин.

Оптический канал 660 нм комплекса «Кондор» используются для косвенных измерений концентрации общей (минеральной и органической) взвеси ( $C_S$ , г/м<sup>3</sup>) в морской среде. Принцип измерения  $C_S$  в соответствии со спектрофотометрической методикой основан на измерении ПОС в красной области спектра, т.е. на длине волны 660 нм. Это связано с тем, что в этой области спектра ослабление определяется главным образом двумя характеристиками: чистой водой, для которой ПОС является величиной практически постоянной, и показателем рассеяния взвесью. Относительный вклад последней в изменчивость ПОС в различных водах может составлять до 100 %.

Оптические каналы комплекса «Кондор» в сине-фиолетовой и зеленой частях видимого спектра ( $\lambda = 405$  нм) и ( $\lambda = 532$  нм) использованы для косвенных измерений концентрации хлорофилла-а (мг/м<sup>3</sup>). Основанием для таких измерений является известные данные об изменениях перепада ПОС на указанных длинах волн при изменениях концентрации хлорофилла-а. В частности по модели Voss, [3], ПОС на длине волны  $\lambda$ ,  $C(\lambda)$ , равен

$$C(\lambda) = C_W(\lambda) + 0,39C_{Chl}^{0,57} \cdot (1,563 - 1,149 \cdot 10^{-3}\lambda), \tag{1}$$

где  $C_W(\lambda) = a_W(\lambda) + b_W(\lambda)$  – ПОС для чистой воды,  $a_W(\lambda)$ ,  $b_W(\lambda)$  – соответственно показатели поглощения и рассеяния,  $C_{Chl}$  – концентрация хлорофилла-а, мг/м<sup>3</sup>.

Для зонда «Кондор»  $C_W(405) = 0,01665 \text{ м}^{-1}$ ,  $C_W(532) = 0,05172 \text{ м}^{-1}$ . После преобразований:

$$\frac{C(405)}{C(532)} = \frac{0,01665 + 0,428C_{Chl}^{0,57}}{0,05172 + 0,371C_{Chl}^{0,57}} = 1,0293C_{Chl}^{0,0467},$$

или 
$$\log \frac{C(405)}{C(532)} = 0,0125 + 0,0467 \log C_{Chl}. \tag{2}$$

Таким образом, логарифм отношения ПОС на указанных длинах волн пропорционален концентрации хлорофилла.

Для измерения характеристик течений в Керченском проливе использовался ADCP WHM 1200 (акустический доплеровский измеритель течений с рабочей частотой 1200 кГц), производства TRDI США. Прибор 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...2 м от дна. Обработка данных выполнялась с учетом влияния корпуса судна на показания магнитного компаса прибора, на основе *GPS*- и *BT*-данных. Детально методические аспекты проведения измерений в мелководных бассейнах и вопросы обработки *ADCP*-данных рассмотрены в работе [4].

**2. Космические съемки.** В период проведения совместных экспедиционных работ 26–28 сентября были безоблачные дни, что позволило использовать космические съемки Керченского пролива, выполненные системой цветových сканеров *MODIS (Aqua & Terra)* и свободно распространяемые *NASA* по сети *INTERNET* (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>). Первичная обработка выполнена на основе программы *Beam VISAT* и включала отбор двух каналов, соответствующих длинам волн 0,645 и 0,8585 мкм, выделение области, содержащей Керченский пролив и прилегающую часть Черного моря, оцифровку данных в единицах яркости ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{стр}^{-1}\cdot\text{мкм}^{-1}$ ), привязку каждого пикселя к географическим координатам. Были обработаны восемь мультиспектральных снимков, относящиеся к датам проведения экспедиционных исследований в Керченском проливе.

При анализе космических съемок реализован метод, основанный на данных международного проекта *AERONET*, обработанных в МГИ. Анализ показал, что пространственная изменчивость аэрозоля над Азово-Черноморским бассейном определяется, главным образом, крупномасштабной адвекцией воздушных масс, в силу чего характерный пространственный масштаб аэрозольных образований равен 160 км. Так как сигналы яркости восходящего излучения от прозрачной воды на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм пренебрежимо малы, измеренные фотометром спутника величины для прозрачных вод можно считать сигналами яркости аэрозольного и молекулярного рассеяния в атмосфере, а сигналы яркости восходящего излучения для зоны близко расположенных вод Керченского пролива – суммой сигналов этого же атмосферного рассеяния и обратного рассеяния взвесью прибрежных вод. Эти положения были использованы при вычислении нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности на указанных длинах волн. В качестве информативного параметра для расчетов концентрации взвеси и хлорофилла-а использован индекс цвета  $I_{wn}(0,645/0,8585)$ , который определяется как отношение яркости нормализованного восходящего излучения на указанных длинах волн с пространственным разрешением 250 м. Для определения взаимосвязи распределений  $I_{wn}(0,645/0,8585)$  с концентрацией взвешенного вещества  $C_S$  и хлорофилла-а  $C_{Chl}$  в приповерхностном слое моря были использованы данные определений этих параметров по результатам обработки квази-синхронно отобранных проб воды в лабораторных условиях ЮНЦ РАН по стандартным методикам. Используются данные таких совместных измерений 2008, 2009 и 2011 гг. (последняя серия измерений выполнена во время проведения совместной экспедиции по данным 38 станций). Анализ показал, что концентрации взвеси и хлорофилла-а определяются по следующим эмпирическим соотношениям  $C_S = 2,1178I_{wn}(0,645/0,8585) - 1,5935$ ,  $C_{Chl} = 0,544I_{wn}(0,645/0,8585) + 0,546$  при  $0,75 \leq I_{wn}(0,645/0,8585) \leq 10$ .

3. Выполнение измерений и обеспечение их единства. Совместная экспедиция ЮНЦ РАН и МГИ НАН Украины выполнялась в Керченском проливе в период с 26 по 30 сентября 2011 г. и ее результаты детально отражены в [1].

Интеркалибрационные станции выполнялись синхронно зондами «Кондор» (МГИ) и *STD90M – Probe* компании «Sea & Sun Technology GmbH» Germany (ЮНЦ РАН) на расстоянии порядка 10 м. Одновременно с поверхности отбирались пробы воды для определения концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и хлорофилла-а в лаборатории ЮНЦ РАН по стандартным методикам. В результате было установлено следующее:

1. Интеркалибрация измерителей температуры и солености (по данным измерений электрической проводимости) показала практически полную идентичность измерительных каналов. Небольшие и нерегулярные расхождения данных относительно линии равных значений объясняются естественной изменчивостью морской среды на пространственных масштабах порядка 10 м [1].

2. Зависимость между показаниями оптического канала на длине волны 660 нм зонда «Кондор» и результатами лабораторных определений гравиметрическим методом концентрации ОВВ в ЮНЦ РАН характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,95. При этом по результатам лабораторных определений концентрации ОВВ были определены коэффициенты пересчета показаний зонда «Кондор» в величины концентрации ОВВ, которые постоянно использовались в дальнейшем.

3. Зависимость между показаниями оптических каналов на длинах волн 405 и 532 нм зонда «Кондор» и результатами лабораторных определений концентрации хлорофилла-а стандартным флуориметрическим методом в ЮНЦ РАН характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,926. При этом по результатам лабораторных определений концентрации хлорофилла-а были определены

коэффициенты пересчета показаний зонда «Кондор» в величины концентрации хлорофилла-а, которые постоянно использовались в дальнейшем [1].

Были выполнены взаимные сличения показаний космических съемок и зонда «Кондор» по концентрациям ОБВ и хлорофилла-а на основе использования независимых определений параметров пересчета показаний этих измерительных средств в величины указанных параметров. Результаты этих сличений показаны на рисунках 2 и 3. На графиках видна значительная дисперсия взаимных показаний относительно линий равных значений. Она объясняется большим числом факторов – различным пространственным разрешением, несинхронностью, наличием резких границ раздела данных, инструментальными погрешностями. Тем не менее, хорошо видна общая тенденция соответствия данных и относительно высокая корреляция, величины которой приведены на этих рисунках. Это дает основание говорить об обеспечении единства измерений по данным космических съемок, контактных измерений и анализа проб в лаборатории ЮНЦ РАН по стандартным методикам.

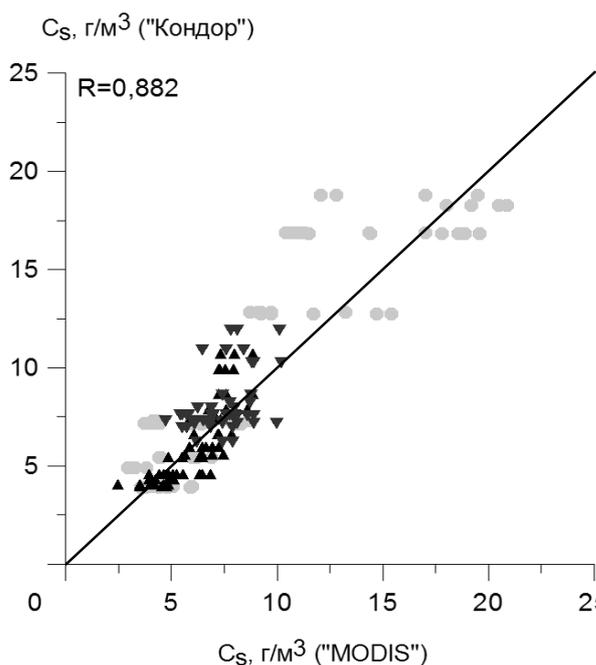


Рисунок 2 – Сопоставление данных измерений концентрации ОБВ по данным зонда «Кондор» и космических съемок сканером MODIS:  
 ● – первый день съемки (интеркалибрация);  
 ▲ – второй день съемки (южный полигон);  
 ▼ – третий день съемки (северный полигон)

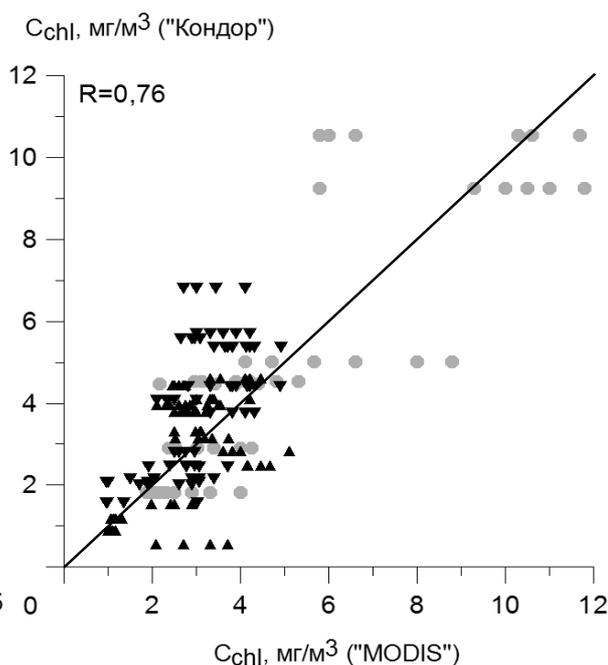


Рисунок 3 – Сопоставление данных измерений концентрации хлорофилла-а по данным зонда «Кондор» и космических съемок сканером MODIS:  
 ● – первый день съемки (интеркалибрация);  
 ▲ – второй день съемки (южный полигон);  
 ▼ – третий день съемки (северный полигон)

4. Результаты исследований. Комплексные экспедиционные исследования в Керченском проливе проводились в период с 26 по 30 сентября 2011 г. В этот период происходило изменение ветрового режима, который оказывает сильное влияние на структуру течений и гидрологических элементов пролива. В период, предшествующий экспедиции, был устойчивый северо-западный ветер, который с 26 по 28.09 стал неустойчивым и изменил преобладающее направление на юго-западное.

Эти изменения проявились в полях гидрологических элементов, поля которых в виде пространственных распределений температуры ( $T$ ), солености ( $S$ ), взвеси (ОБВ) и хлорофилла-а ( $Chl - a$ ) вдоль Керченского пролива показаны на рисунке 4. Соответствующие изменения проявились в пространственных распределениях концентрации взвеси по данным космических съемок. Так концентрация взвеси в северной части пролива уменьшилась до 8...10 г/м<sup>3</sup>, что соответствует данным контактных измерений. Южнее о. Коса Тузла концентрация взвеси составила 6...8 г/м<sup>3</sup>, что также совпадает с результатами контактных измерений.

Изменения в пространственной структуре полей температуры, солености, концентрации взвеси и хлорофилла-а связаны, вероятно, с перестройкой поля течений, что подтверждается данными измерений ADCP (рисунок 5). В результате этой перестройки в северной части пролива сформировался поток относительно прозрачных черноморских вод, что хорошо видно по распределению концентрации взвеси 28.09. По данным измерений ADCP поток из Азовского моря севернее о. Коса Тузла отклоняется в западном направлении в Таманский залив (там наблюдается высокая концентрация взвеси) и южнее протоки между о. Коса Тузла и дамбой смешивается с водами Черного моря.

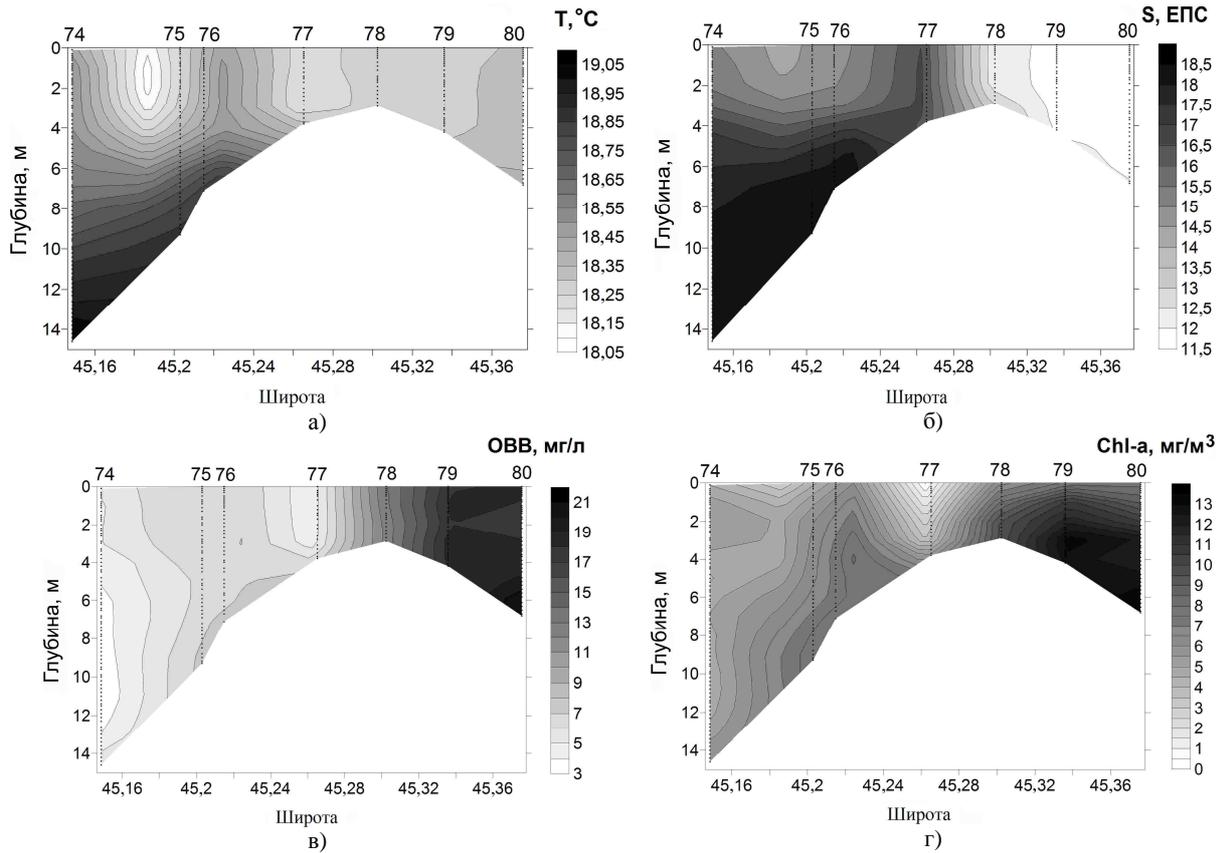


Рисунок 4 – Пространственные распределения температуры (Т), солёности (S), концентрации суммарной взвеси (ОВВ) и хлорофилла-а (Chl-a) вдоль Керченского пролива 26.09.2011 г.

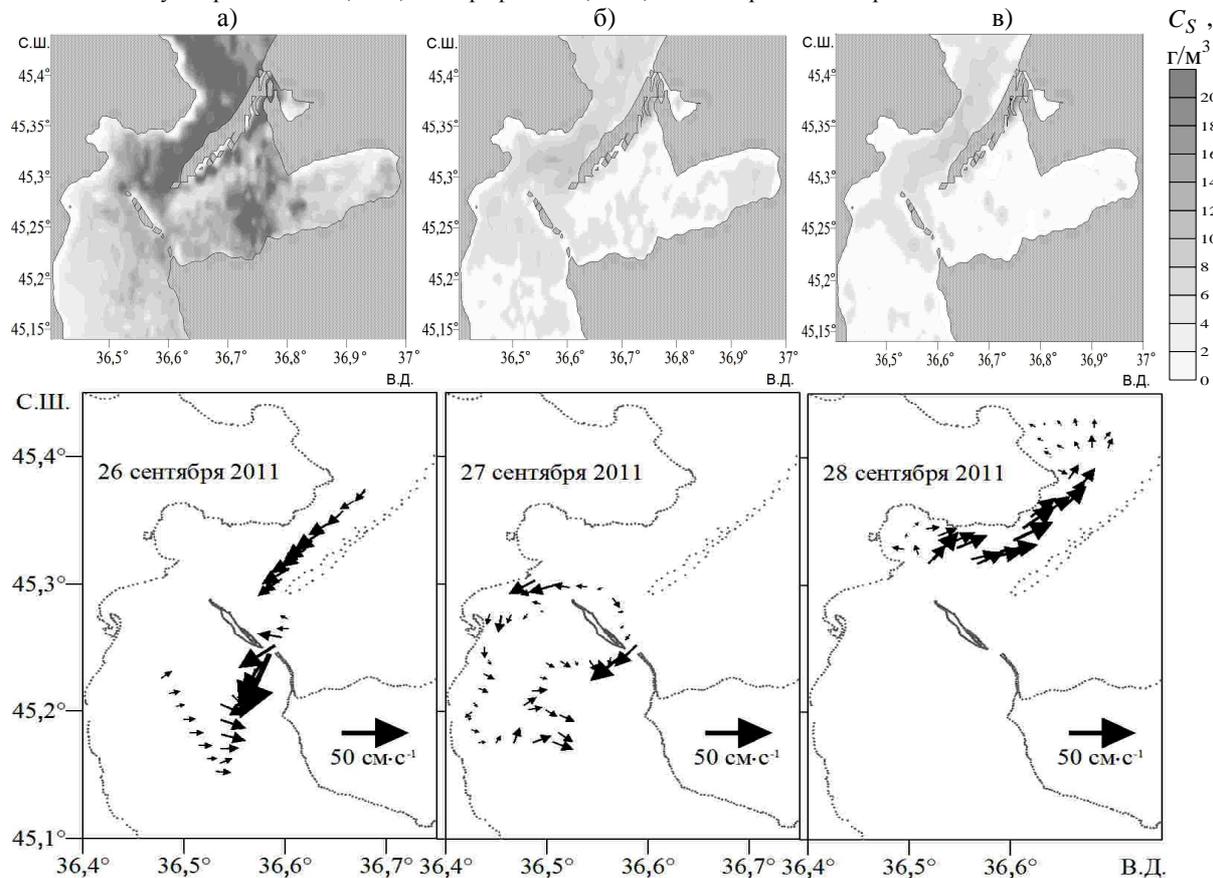


Рисунок 5 – Пространственные распределения концентрации взвеси ( $г/м^3$ ) и осредненных по глубине течений (нижний рисунок) при выполнении съемки Керченского пролива 26 (а), 27 (б) и 28 (в) сентября 2011 г.

### **Заключення и выводы**

1. В результате выполнения комплексных экспедиционных исследований, выполненных при помощи рассмотренной автоматизированной системы, выявлены особенности динамики вод и структуры полей температуры, солености, концентрации суммарного взвешенного вещества и хлорофилла-а в Керченском проливе в условиях переменного ветра. Показано, что при изменении направления ветра с северо-западного на юго-западное в течение суток происходит глубокая перестройка течений и связанные с этим изменения структуры полей температуры, солености, концентрации взвеси и хлорофилла-а. Эти изменения наблюдаются по всей глубине и характеризуются сложной пространственной структурой.

2. Выполнение комплексных интеркалибрационных измерений (индекс цвета – концентрация ОВВ и хлорофилла-а по данным квази-синхронных космических съемок и отборов проб с последующими лабораторными определениями), а также синхронные измерения СТД параметров и отборы проб с лабораторными определениями концентраций ОВВ и хлорофилла-а послужили основой для обеспечения единства измерений всего комплекса измерительных средств при выполнении совместной ЮНЦ РАН и МГИ экспедиции в Керченском проливе.

3. Анализ пространственных распределений концентрации взвеси по данным космических съемок показал, что их основные особенности совпадают по структуре и по величинам с данными независимых контактных измерений. Основные изменения концентрации взвеси в проливе согласуются с изменениями течений, причем высокой концентрации взвеси соответствует поступление воды из Азовского моря, а при поступлении воды из Черного моря концентрация взвеси значительно уменьшается. Таким образом, изменения концентрации взвеси по данным оперативных спутников в перспективе можно будет использовать для определения характера водообмена между Азовским и Черным морями.

4. Комплексный характер полученных данных свидетельствует о высокой эффективности рассмотренной автоматизированной системы сбора и обработки данных на таких сложных в динамическом отношении водных объектах как Керченский пролив. Представленная в работе система позволит собрать и обработать материалы изысканий, необходимых для обширной программы гидротехнического строительства в Керченском проливе и других районах Азово-черноморского бассейна, обеспечить оперативной информацией о состоянии водной экосистемы зон рекреации, районов размещения и культивирования аквакультуры, добычи полезных ископаемых в морских условиях, рыбного промысла.

Авторы работы благодарят коллег из ЮНЦ РАН, принимавших участие в совместной экспедиции и в обработке данных измерений.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-05-90439-Укр\_ф\_а (Россия) и ДФФД Ф40 68 (Украина).

### **Библиографический список использованной литературы**

1. Кушнир В.М. Результаты комплексных исследований совместной экспедиции МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН в Керченском проливе в осенний период 2011 г. / В.М. Кушнир, С.В. Бердников, А.И. Чепыженко, В.В. Поважный, А.Н. Морозов, О.В. Степаньян // Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Чёрном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования: сборник статей (по материалам российско-украинского семинара, Ростов-на-Дону, 6–8 июня 2011 г.). — Ростов-на-Дону. Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. — С. 29 – 36.

2. Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР» [Электронный ресурс]. — Каталог оборудования фирмы HYDROoptics Ltd. — Режим доступа: <http://ecodevice.com.ua/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor/Doc 11, HTML 16 January 2012>.

3. Voss K.J. A spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas / K.J. Voss // Limnol. Oceanogr. — 1992. — 37 (3). — P. 501–509.

4. Морозов А.Н. Опыт использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в условиях Черного моря / А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. — Вып. 12. — С. 457–476.

*Поступила в редакцию 21.11.2013 г.*

**Чепиженко Г. О., Чепиженко О. І., Кушнір В. М. Нові автоматизовані прилади та космічні зйомки для проведення досліджень у Керченській протоці**

Розглянута можливість та результати застосування сучасних вимірювальних засобів та методів обробки космічних зйомок для отримання кількісних оцінок концентрації завесі та хлорофілу-а у Керченській протоці.

**Ключові слова:** гідрофізичний зонд, акустичний вимірювач параметрів течій, сумарно зважена речовина, хлорофіл-а, сканер кольору системи MODIS.

**Chepyzhenko A.A., Chepyzhenko A.I., Kushnir V.M. The new autonomous meters and space data for the Kerch strait waters' research**

The possibility and results of using the modern measuring meters and methods of the satellite imagery for obtaining the quantitative estimates of the total suspended matter and chlorophyll-a concentrations in the Kerch Strait are presented.

**Keywords:** hydrophysical probe, acoustic flow meter, total suspended matter (TSM), chlorophyll-a, the MODIS system color scanner.