

12. *Соболев В.В.* Исследование атмосферы Венеры. II / В.В. Соболев // *Астрономический журнал*. – 1968. – 45, № 1. – С. 169–176.
13. *Morozhenko A.V.* The optical properties of Venus and the Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations / A.V. Morozhenko, E.G. Yanovitskij // *Icarus*. – 1973. – 18, № 3. – P. 583–592.
14. *Kattawar G.M.* Scattering in the atmosphere of Venus. II. Effects of varying the scale height of the scattering particles / G.M. Kattawar, L.D.C. Young // *Icarus*. – 1977. – 30, № 1. – P. 179–185.
15. Light scattering by nonspherical particles: Halifax contributions / ed. by: G. Videen, Q. Fu, P. Chyleck. – 2000. – 335 p.
16. *Минин И.Н.* Оптическая модель атмосферы Марса / И.Н. Минин // *Астрономический журнал*. – 1967. – 44, № 6. – С. 1284–1295.
17. *Мороженко А.В.* Определение атмосферного давления у поверхности Марса по поляриметрическим наблюдениям / А.В. Мороженко // *Астрономический циркуляр*. – 1965. – № 337. – С. 1–4.
18. *Мороженко А.В.* Атмосфера Марса по поляризационным наблюдениям / А.В. Мороженко // *Астрономический журнал*. – 1969. – 46, № 5. – С. 1087–1094.
19. *Мороженко А.В.* Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. 1. Аэрозольная составляющая чистой атмосферы / А.В. Мороженко // *Астрономический вестник*. – 1974. – 8, № 3. – С. 121–127.
20. *Ingersol A.P.* Polarization measurements of Mars and Mercury: Rayleigh scattering in the Martian atmosphere / A.P. Ingersol // *Astrophys. J.* – 1971. – 163, № 1, Pt.1. – P. 121–130.
21. *Мороженко О.В.* Концепція моніторингу газового та аерозольного (для висот більше 30 км) забруднення земної атмосфери з борту Міжнародної космічної станції / О.В. Мороженко, А.В. Шаврина, О.О. Вельсь // *Космічна наука і технологія*. – 2000. – 6, № 2/3. – С. 68–79.
22. Український молодіжний супутник: Дослідження аерозольного шару атмосфери Землі за допомогою УФ-поляриметра / Є.П. Неводовський, А.П. Відьмаченко, О.В. Мороженко [та ін.] // *Там само*. – 2004. – 10, № 5/6. – С. 27–32.
23. Изучение характеристик аэрозоля стратосферы Земли методом ультрафиолетовой поляриметрии / П.В. Неводовский, А.В. Мороженко, Е.П. Неводовский, М.Д. Гераимчук // *Оптика и спектроскопия*. – 2009. – 107, № 2. – С. 231–238.
24. Елементи і системи поляризаційних приладів для космічних досліджень / М.Д. Гераїмчук, О.М. Генкін, О.В. Івахів [та ін.]. – К.: ЕКМО, 2009. – 188 с.

УДК 551.465

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ И КОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

А.А. Чепыженко, ведущий инженер Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины, г. Севастополь

А.И. Чепыженко, кандидат технических наук, научный сотрудник МГИ НАН Украины, г. Севастополь

В.М. Кушнир, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник МГИ НАН Украины, г. Севастополь



А.А. Чепыженко

А.И. Чепыженко

В.М. Кушнир

(Chl) в Керченском проливе. Выявлены особенности динамики вод и структуры полей температуры, солености, концентрации ОВВ и Chl в условиях переменного ветра.

The results of the use of multispectral satellite acquisition and contact measurements to obtain the quantitative assessment of the concentration of total suspended solids (TSS) and chlorophyll a (Chl) in the Kerch Strait are considered. The features of water dynamics and structures of the fields of temperature, salinity, TSS and Chl concentration under the variable wind direction are identified.

Рассмотрены результаты использования мультиспектральных космических съемок и контактных измерений для получения количественных оценок концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и хлорофилла а

Керченский пролив имеет большое значение для экономического комплекса Украины и России как важнейшая транспортная магистраль меж-

ду портами Азовского и Черного морей с выходом в Мировой океан, зона рыболовства и рекреации. По этим и другим причинам проблема исследований структуры вод в проливе является традиционно актуальной. Для ее решения в МГИ НАН Украины были разработаны несколько модификаций малогабаритных STD зондов со встроенной памятью, что позволяет использовать их с маломерных судов, без применения специальных лебедок. Некоторые из этих приборов оснащены датчиками дополнительных параметров, что расширяет функциональные возможности таких систем. Один из таких приборов, зонд “Кондор” (разработан канд. техн. наук А.И. Чепыженко), широко используется для выполнения исследований Керченского пролива и прибрежных зон Крыма [1]. Внешний вид зонда “Кондор” представлен на рис. 1, а его основные характеристики — в таблице.

Оптический канал 660 нм комплекса “Кондор” используется для косвенных измерений концентрации общей (минеральной и органической) взвеси C_s (г/м³) в морской среде. Принцип измерения C_s , в соответствии со спектрофотометрической методикой, основан на измерении показателя ослабления света (ПОС) в красной области спектра, то есть 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 ($\lambda = 405$ и 532 нм) использованы для косвенных измерений концентрации хлорофилла a (мг/м³). Основанием для таких измерений являются известные данные об изменениях перепада ПОС на указанных длинах волн при изменениях концентрации хлоро-



Рис. 1. Внешний вид зонда “Кондор”

филла a . В частности, по модели Voss [3] ПОС на длине волны λ , $C(\lambda)$, равен

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

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 a , мг/м³.

Для зонда “Кондор” $C_w(405) = 0,01665 \text{ м}^{-1}$, $C_w(532) = 0,05172 \text{ м}^{-1}$. После преобразований имеем

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

$$\text{или } \log\left(\frac{C(405)}{C(532)}\right) = 0,0125 + 0,0467 \log C_{chl}.$$

Характеристики зонда “Кондор”

Характеристика	Диапазон	Цена единицы наименьшего разряда	Суммарная погрешность измерения
Температура, °С	-2...35 °С	0,02 °С	±0,1
Электропроводность, отн. ед. (мСим/см):			
1-й диапазон	от 0 до 0,9(42)	2,44 · 10 ⁻⁴	± 1 · 10 ⁻³
2-й диапазон	от 0,62(26,6) до 1,6(69)	(0,0105)	(0,04)
Гидростатическое давление, Мпа (глубина погружения)	0...1 до 100 м	0,001...0,1 м	±0,003
Показатель ослабления, м ⁻¹ для 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/с	0,2...100	0,05	0,15
Направление течения, град	0...360	0,5	2

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

Для измерения характеристик течений в Керченском проливе использовался ADCP WHM1200 (акустический доплеровский измеритель течений с рабочей частотой 1200 кГц) производства TRDI, США. Прибор был установлен на штанге, жестко прикрепленной к борту маломерного судна.

В период проведения экспедиционных работ 26–28 сентября 2011 г. были безоблачные дни, что позволило использовать космические съемки Керченского пролива, выполненные системой цветковых сканеров MODIS (Aqua&Terra). Первичная обработка выполнена на основе программы Beam VISAT и включала отбор двух каналов, соответствующих длинам волн 645 и 858,5 нм, 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, относящихся 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 645 и 858,5 нм 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. В качестве информативного параметра для расчетов концентрации взвеси и хлорофилла a использован индекс цвета $I_{\text{wn}}(645/858,5)$, который определяется как отношение яркости нормализованного восходящего излучения на указанных длинах волн с пространственным разрешением 250 м. Для определения взаимосвязи распределений $I_{\text{wn}}(0,645/0,8585)$ с концентрацией взвешенного вещества C_s и хлорофилла a C_{chl} в приповерхностном слое моря были использованы данные определений этих параметров по результатам обработки квазисинхронно отобранных проб воды в лабораторных условиях Южного научного центра (ЮНЦ) РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия, по стандартным методикам. Использованы 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 a определяются по следующим эмпирическим соотношениям:

$$C_s = 2,1178 I_{\text{wn}}(0,645/0,8585) - 1,5935;$$

$$C_{\text{chl}} = 0,544 I_{\text{wn}}(0,645/0,8585) + 0,546$$

при $0,75 \leq I_{\text{wn}}(0,645/0,8585) \leq 10$ [3].

В ходе совместной экспедиции ЮНЦ РАН и МГИ НАН Украины (26–30 сентября 2011 г.) были выполнены интеркалибрационные измерения зондами “Кондор” (МГИ) и STD90M – Probe компании “Sea&Sun Technology GmbH”, Германия (ЮНЦ), при сближении плавсредств на расстоянии порядка 10 м. Одновременно с поверхности отбирались пробы воды для определения концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и хлорофилла a в лаборатории ЮНЦ по стандартным методикам. В результате было установлено:

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 [3];

2) зависимость между показаниями оптического канала на длине волны 660 нм зонда “Кондор” и результатами лабораторных определений гравиметрическим методом концентрации ОВВ в ЮНЦ характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,95;

3) зависимость между показаниями оптических каналов на длинах волн 405 и 532 нм зонда “Кондор” и результатами лабораторных определений концентрации хлорофилла a стандартным флуориметрическим методом в ЮНЦ характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,926.

Были выполнены взаимные сличения показаний космических съемок и зонда “Кондор” по концентрациям ОВВ и хлорофилла a на основе использования независимых определений указанных параметров. Результаты этих сличений отражены на рис. 2 и 3. На графиках видна значительная дисперсия взаимных показаний относительно линий равных значений, которая 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 рисунках, что дает основание говорить об обеспечении единства измерений по данным космических съемок, контактных измерений и анализа проб в лаборатории ЮНЦ по стандартным методикам.

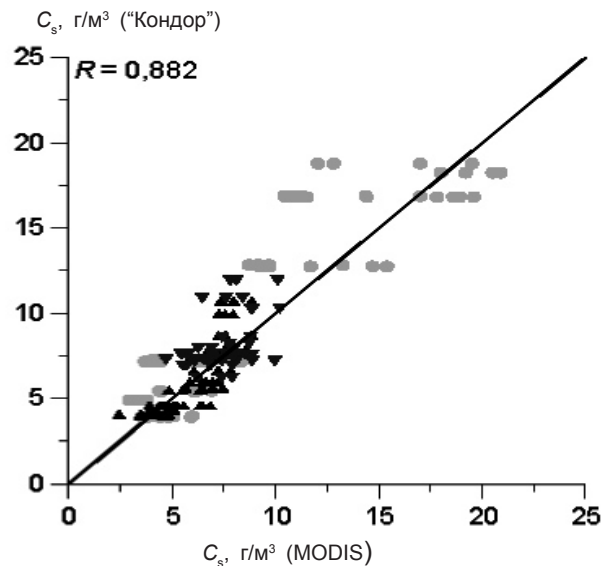


Рис. 2. Сопоставление данных измерений концентрации ОБВ по данным зонда "Кондор" и космических съемок сканером MODIS: ● – первый день съемки (интеркалибрация); ▲ – второй день съемки (южный полигон); ▼ – третий день съемки (северный полигон)

Комплексные экспедиционные исследования в Керченском проливе проводились в период с 26 по 30 сентября 2011 г. В это время происходило изменение ветрового режима, который оказывает сильное влияние на структуру течений и гидрологических элементов в проливе.

В период, предшествующий экспедиции, был устойчивый северо-западный ветер, который с 26 по 28 сентября стал неустойчивым и изменил преобладающее направление на юго-западное, южное. Эти изменения ветрового режима сказались на изменении пространственной структуры течений, а также температуры, солености, концентрации взвеси и хлорофилла *a*. На рис. 4 показаны пространственные распределения скорости течений (данные ADCP) и концентрации взвеси по данным измерений 26–28 сентября 2011 г. В первый из этих дней поток азовских

вод с высокой концентрацией взвеси был направлен в Черное море под действием северного ветра. Затем течение стало неустойчивым, концентрация взвеси уменьшилась и, наконец, 28 сентября под действием ветра южного направления в проливе преобладали воды Черного моря с относительно низким содержанием взвеси, что наглядно проявилось на рис. 4.

Таким образом, анализ пространственных распределений концентрации взвеси и хлорофилла *a* 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

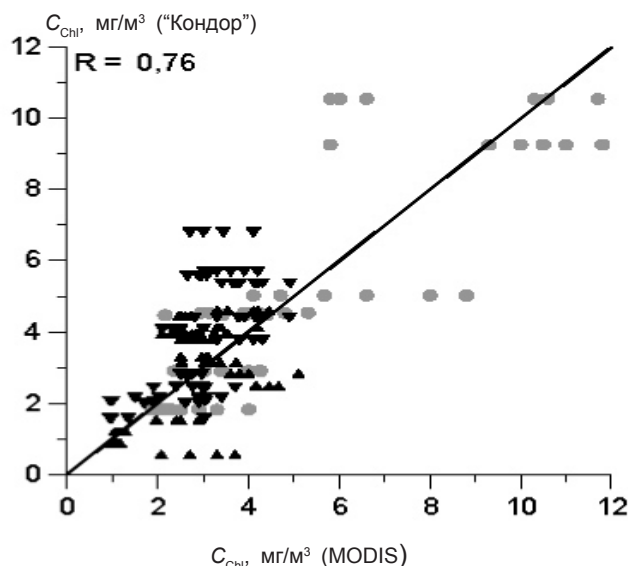


Рис. 3. Сопоставление данных измерений концентрации хлорофилла *a* по данным зонда "Кондор" и космических съемок сканером MODIS: ● – первый день съемки (интеркалибрация); ▲ – второй день съемки (южный полигон); ▼ – третий день съемки (северный полигон)

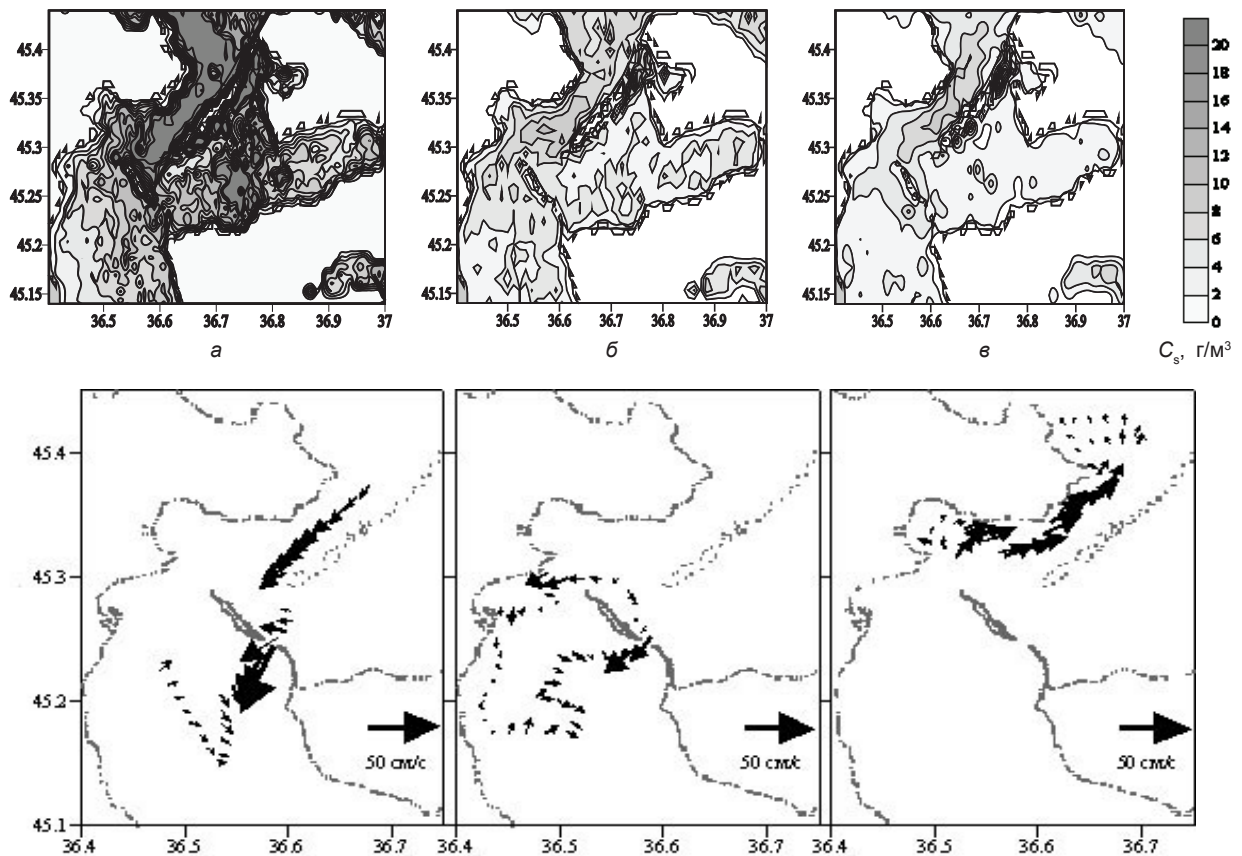


Рис. 4. Пространственные распределения концентрации взвеси (г/м^3) и осредненных по глубине течений (нижний рисунок) при выполнении съемки Керченского пролива 26 (а), 27 (б) и 28 (в) сентября 2011 г.

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.

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).

Список литературы

1. <http://ecodevice.com.ua/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor>.

2. 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.
3. 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 [и др.] // *Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Чёрном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования: сб.* – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. – С. 29–36.