

УДК. 528.8.04

## А. И. Чепыженко

Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь

# Оптические системы для подспутниковой заверки результатов космических исследований морских акваторий

*Надійшла до редакції 09.12.03*

Описано прилади, призначенні для вимірювання гідрооптичних характеристик морського середовища. Приведено результати порівняння досліджень акваторій в районі острова Змійний і Севастопольської бухти з космічними знімками цих районів.

Для заверки результатов космических исследований морских акваторий и корректировки методик дешифрирования космических снимков морской поверхности необходимо на специально выбранных тестовых участках водной поверхности проводить подспутниковые контрольно-калибровочные измерения различных гидрофизических характеристик, в том числе в оптическом диапазоне спектра.

Морская поверхность является тем природным интегратором информации, который позволяет судить о процессах, происходящих не только на водной поверхности, но и в толще воды. При этом большинство дистанционно регистрируемых с космических аппаратов (КА) параметров водной среды являются оптически активными компонентами. Поэтому в качестве информативных признаков используются такие оптические характеристики, как коэффициенты спектрального отражения и излучения, коэффициенты спектральной яркости и их отношения.

Цель данной работы заключается в рассмотрении оптико-электронных систем, специально разработанных в Морском гидрофизическом институте НАН Украины и используемых для подспутниковой заверки результатов морских исследований космическими системами.

Исследуемые районы (прибрежные зоны, эстуарии рек, акватории бухт и портов) характеризуются высокой временной и пространственной изменчивостью, многочисленностью и разнообразием ис-

точников природных и загрязняющих веществ антропогенного происхождения. Компонентами, обуславливающими поглощение и отражение света водной средой, являются: чистая вода, растворенные органические вещества, пигменты фитопланктона, взвешенное вещество и другие загрязняющие водную среду вещества [3, 4]. В прибрежной зоне и акваториях бухт доминирующими являются загрязнения антропогенного происхождения. Соотношение между этими оптически активными компонентами и определяет спектр отраженного и поглощенного водой света.

Для измерения концентрации загрязняющих веществ в водной среде, толщины поверхностной пленки углеводородов и характеристик естественного светового поля в водной среде были разработаны и изготовлены различные гидрооптические приборы: гидролого-оптико-химический комплекс ОГХ (рис. 1), спектральный измеритель показателя ослабления ЛИПО и две модификации измерителя спектральных характеристик ИСХ-ИПО и ИСХ-П (табл. 1), измеритель толщины поверхностной пленки «Слой», измерители фотосинтетически активной радиации (ФАР) «Квант» и характеристики естественного светового поля «Спектр».

Измерения спектральных характеристик водной среды выполняются как непосредственно *in situ* (гидролого-оптико-химический комплекс ОГХ, «Квант», «Спектр»), так и по пробам воды, отобранным с помощью батометра или с применением

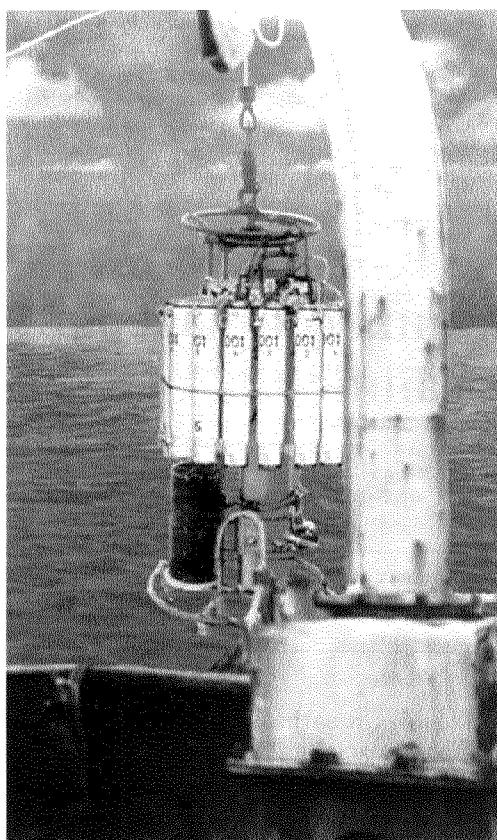


Рис. 1. Гидролого-оптико-химический комплекс ОГХ



Рис. 2. Измеритель спектральных характеристик ИСХ-ИПО

Таблица 1. Технические характеристики приборов

Измеряемый параметр		Комплекс ОГХ	Измеритель ИСХ-ИПО
Прозрачность	Диапазон	0.01—1.0 5 %	0.01—20 5 %
	Спектральный диапазон, нм	418, 660	380—700
Температура	Диапазон, °С	-2...-35	—
	Погрешность, °С	0.004	—
Соленость (расчетная)	Диапазон	10—45	—
	Погрешность	0.004	—

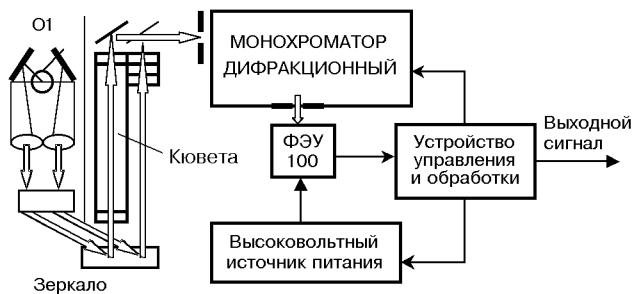


Рис. 3. Структурная схема измерителя ИСХ-ИПО

проточной системы (измерители ИСХ-ИПО и ИСХ-П). Процедура отбора проб и условия их хранения не должны влиять на оптические свойства исследуемой воды. При хранении проб не более 5–6 ч погрешность измерения составляет порядка 12–15 %. Для проточной системы, при всех ее достоинствах, необходимым требованием является соблюдение определенной скорости протока воды и контроль за возможным образованием на внутренней поверхности кюветы пузырьков воздуха, приводящих к повышенному светорассеянию и погрешности измерения.

Измеритель спектральных характеристик ИСХ-ИПО (рис. 2, 3) состоит из оптико-механического блока, двухбазовой кюветы, дифракционного монохроматора, фотоприемного блока ФЭУ-100, высоковольтного источника питания и устройства управления и обработки информационного сигнала. Коллимированные световые потоки, сформированные оптико-механическим блоком, ослабляются водной средой в двухбазовой кювете и, после спектрального разложения дифракционным монохроматором, регистрируются фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Спектральное ослабление каждого из

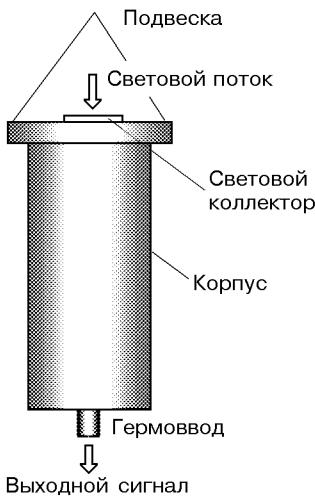


Рис. 4. Квантометр «Квант»

световых потоков определяется длиной пути, которое они проходят в водной среде (оптической базой). При идентичности каналов формирования световых потоков и их измерения это позволяет с помощью формулы (1) непосредственно, без внесения эмпирических коэффициентов, измерять спектральный показатель ослабления  $\varepsilon_\lambda$  (прозрачность водной среды):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{1}{L_B - L_M} \cdot \lg \frac{E_B}{E_M}, \quad (1)$$

где  $E_B$ ,  $E_M$  — значения световых потоков на выходе большой и малой базы двухбазовой кюветы,  $L_B$ ,  $L_M$  — длина большой и малой базы кюветы,  $\lambda$  — длина световой волны.

Спектральное разрешение диспергирующего устройства в диапазоне измерения  $\lambda\lambda 380...700$  нм определяется задачей восстановления концентраций конкретных веществ и составляет 5 (10) нм. Вещества, имеющие монотонную одновершинную спектральную характеристику поглощения (РОВ) надежней регистрируются, чем хлорофилл, имеющий двухвершинное спектральное распределение. Наличие в водной среде веществ, обусловленных антропогенным фактором, значительно усложняет решение поставленной задачи [7].

Измеритель фотосинтетически активной радиации — квантометр «Квант» [6] (рис. 4) предназначен для изучения условий биоценоза и физического процесса, происходящего в биологической системе при фотосинтезе в водной среде. Структурная схема квантометра приведена на рис. 5. Оптическая система квантометра, содержащая косинусный кол-

лектор, корректирующий светофильтр и нормализующее спектральное устройство, формирует в плоскости ФЭУ световой поток с определенной спектральной характеристикой.

Измерительное устройство преобразует входной световой поток в электрический сигнал. Широкий динамический диапазон измерения (8 порядков) и высокое быстродействие (250 мс) обеспечено применением трехкомпонентной системы стабилизации анодной чувствительности ФЭУ [1]. При этом полностью исключается или снижается до допустимого значения влияние на результат измерения нестабильности фотоприемника — ФЭУ (временная, температурная, зонная и «усталость» фотокатода, вызывающая снижение чувствительности фотоприемника после воздействия больших засветок).

Спектральная характеристика квантометра в диапазоне  $\lambda\lambda 380...700$  нм пропорциональна длине волны  $\lambda$ . Его показания, связанные с числом квантов, определяются выражением (2):

$$Q = \text{const} \cdot h \cdot C \cdot \int_{380}^{700} N(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $Q$  — квантовая освещенность (квант  $\cdot$  см $^{-2}$   $\cdot$  с $^{-1}$ ),  $N$  — количество квантов,  $h$  — постоянная Планка ( $6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с),  $c$  — скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с),  $\lambda$  — длина световой волны (нм).

Измерение нисходящей или восходящей квантовой освещенности обеспечивается ориентацией квантометра (вверх или вниз коллектором).

Нефтепродукты относятся к числу наиболее распространенных и опасных веществ, загрязняющих водную поверхность. Нефтяная пленка, являясь одной из миграционных форм нефтепродуктов в водной среде, существенно изменяет ее физические и световые характеристики, регистрируемые дистанционно, коэффициенты спектрального отражения и спектральной яркости.

Принцип работы автономного измерителя толщины нефтяной пленки на водной поверхности (рис. 6) основан на вариациях спектрального индекса поглощения светового потока при прохождении света через границу раздела водной среды и углеводородной поверхностной пленки. Толщина  $H$  нефтяной пленки зависит от спектрального индекса показателя поглощения  $T$  и показателя поглощения углеводородов  $X$ , составляющих поверхностную пленку и определяется выражением (3):

$$H = \frac{-\ln T - 0.065}{2} X. \quad (3)$$

Показатель истинного поглощения света в водной среде относится к наиболее важным гидрооптическим характеристикам. Непосредственное измере-

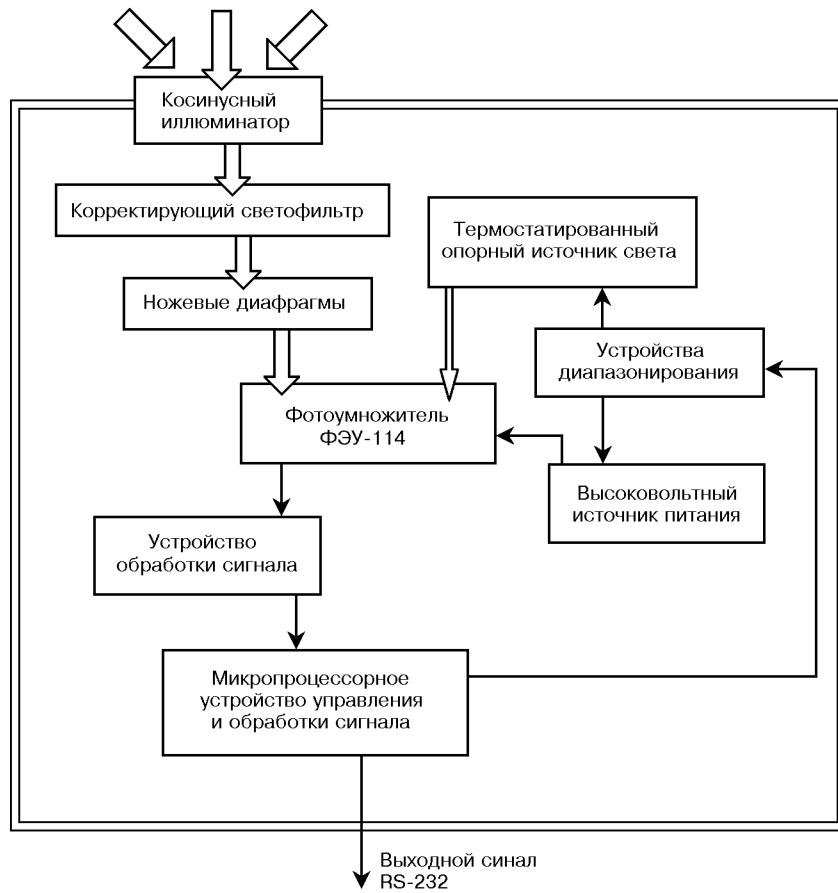


Рис. 5. Структурная схема квантометра «Квант»

ние его невозможно, а расчет показателя поглощения  $X$  как разность показателя ослабления  $\varepsilon$  и показателя рассеяния  $\sigma$ :  $X = \varepsilon - \sigma$  приводит к низкой точности его определения.

Известно [4], что при неконтактных измерениях показателя поглощения основным методом является метод обратного рассеяния. Измеряя три фотометрические величины: яркость моря в nadir, облученность моря и яркость неба в зените, можно рассчитать показатель поглощения. Измерение показателя поглощения непосредственно в среде основано на измерении основных характеристик светового поля на двух разнесенных по глубине горизонтах и расчете спектральной энергии, поглощенной в данном слое. В основе этого метода лежит уравнение для дивергенции светового вектора  $H$ :  $\text{div}H = -XE_0$ , где  $E_0$  — пространственная облученность. Применяя это уравнение, можно получить формулы для определения  $X$ , содержащие непосредственно измеряемые световые величины [5].

В большинстве случаев с погрешностью 5—6 % применима формула  $X = \mu\alpha_0$ , где  $\mu$  — средний косинус тела яркости,  $\alpha_0$  — пространственный показатель вертикального ослабления.

Учитывая зависимость между значениями среднего косинуса тела яркости  $\mu$ , коэффициентом диффузного отражения моря  $R$  и степенью вытянутости тела яркости, средний косинус тела яркости  $\mu$  определяется как функция коэффициента диффузного отражения моря  $R$  [2].

Непосредственное измерение спектральной облученности сверху  $E_\downarrow$ , спектрального показателя вертикального ослабления нисходящего естественного светового потока  $\lambda_\downarrow$  и спектрального коэффициента диффузного отражения  $R$  на разнесенной по глубине оптической базе измерителем «Спектр» (рис. 7) позволяет измерять спектральную облученность, поглощенную слоем воды, и рассчитать истинную концентрацию хлорофилла и спектральное поглощение света пигментами фитопланктона —

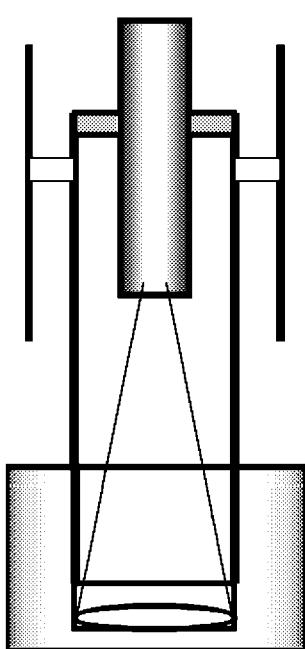


Рис. 6. Измеритель толщины нефтяной пленки

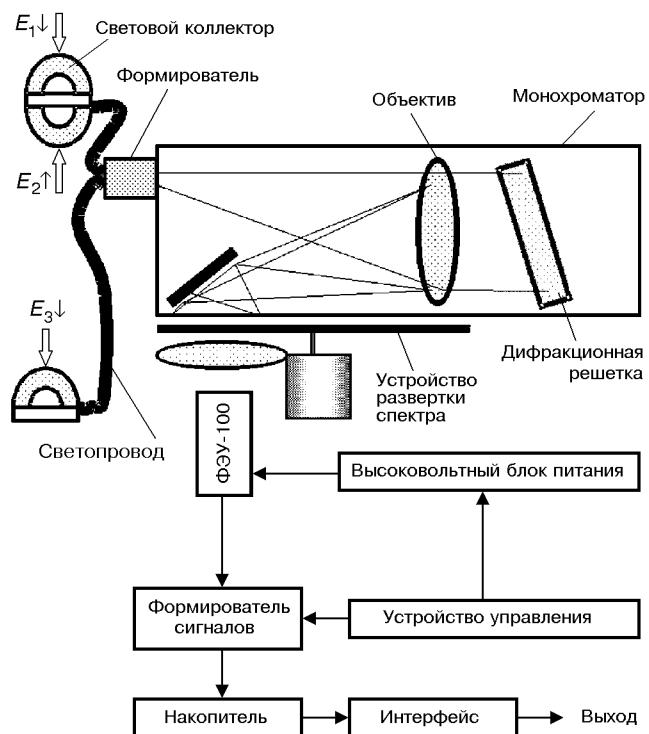


Рис. 8. Структурная схема измерителя истинного поглощения

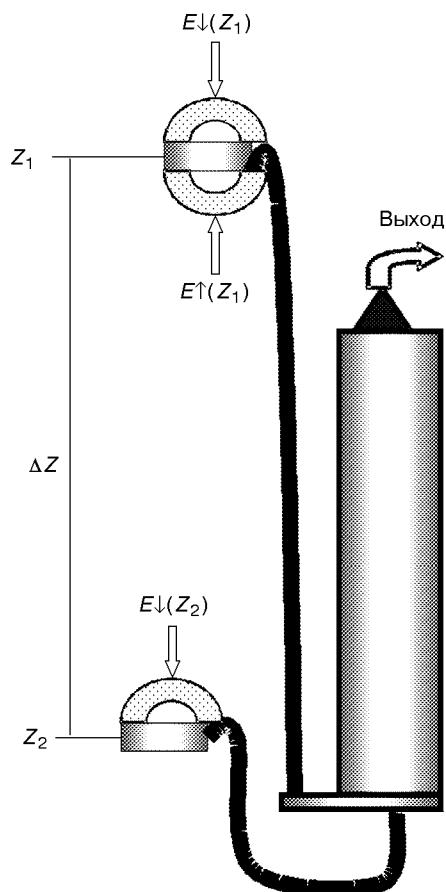


Рис. 7. Измеритель истинного поглощения света

Таблица 2. Технические характеристики измерителя истинного поглощения

Спектральный диапазон, нм	380—700
Спектральное разрешение, нм	5
Время сканирования спектра, мс	50
Диапазон изменения оптической базы, м	0—2
Коэффициент поглощения, м <sup>-1</sup>	0.005—0.5
Погрешность измерения, %	5
Диаграмма направленности коллекторов	косинусная
Динамический диапазон изменения естественного светового потока	10 <sup>7</sup>
Глубина погружения, м	200

концентрацию пигментной энергии ( $N_n$ ). При измерении энергии  $Q$  облученности в квантах квантотометром «Квант» [6] можно оценить уровень первичной продукции  $P = f(Q, N_n, T_{\phi})$  за эффективное время исследования в фотической зоне ( $T_{\phi}$ ). Измеритель «Спектр» [8] состоит из световых коллекторов, спектрального и измерительного устройства (рис. 8). Световой поток из двух разнесенных по глубине горизонтов через световые коллекторы по-

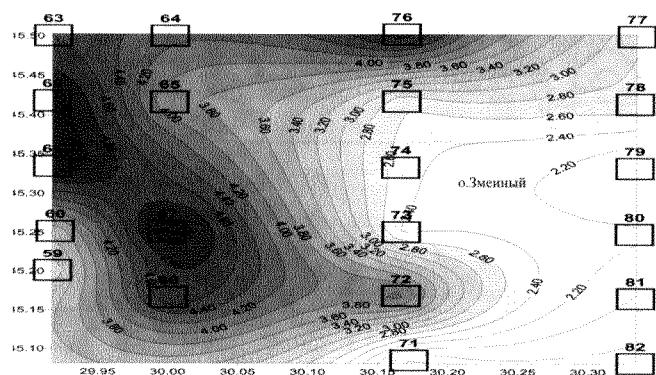


Рис. 9. Пространственное распределение концентрации взвешенного вещества Сзв, мг/л для района о. Змеиный (07.10.1997 г.)

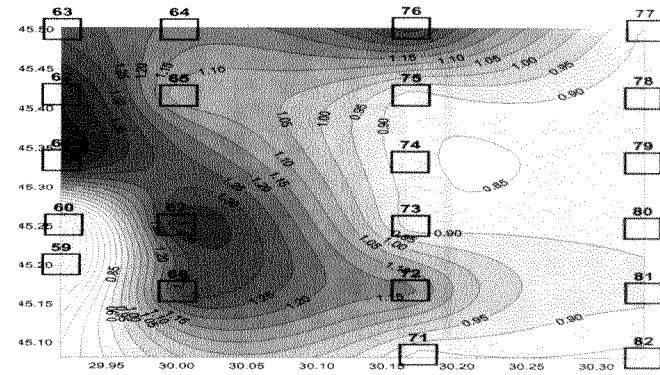


Рис. 10. Пространственное распределение концентрации растворенного органического вещества, отн. ед. для района о. Змеиный (07.10.1997 г.)

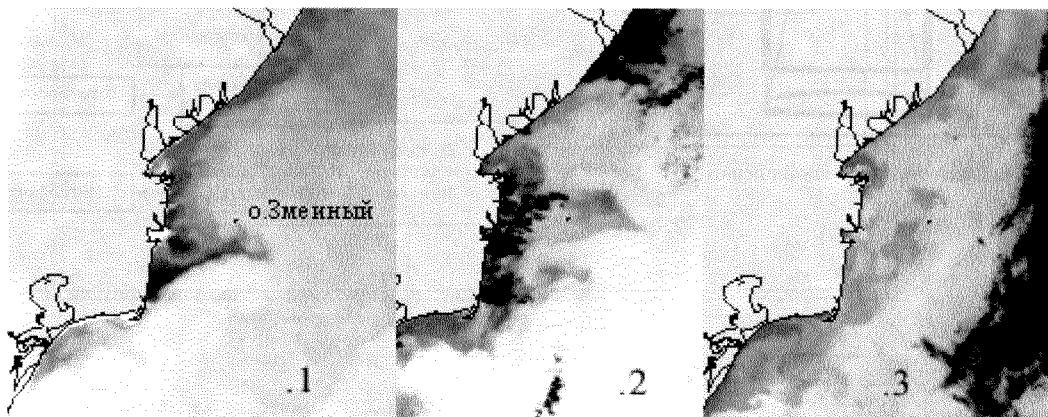


Рис. 11. Космические снимки КС AVNRR ИСЗ NOAA (0.725—1.1 мкм), района о. Змеиный (а — 8.10.1997 г., б — 17.10.1997 г., в — 21.10.1997 г.).

ступает на сканирующий дифракционный монохроматор. Сформированный монохроматический световой поток измерительным устройством регистрируется и преобразуется в частотно-модулированный электрический сигнал, а затем — в последовательный код (табл. 2).

Разработанные оптико-электронные приборы были испытаны в районе острова Змеиный и Севастопольской бухты.

Район о. Змеиный динамически активен. Время проведения натурных исследований (с 10 по 12 октября) совпало с изменением метеорологической обстановки (увеличение ветра (до 15 м/с) и волнения моря (до 4—5 баллов)). Особенностью циркуляции вод данной акватории являлась двухслойная структура и перенос вод в северо-восточном направлении вдоль береговой черты в верхнем слое. Известно, что акваториям, подверженным влиянию

речного стока, свойственна наибольшая изменчивость поверхностной солености. Распресняющее действие рек распространяется на десятки миль. Основная часть крупнодисперсной взвеси осаждается в зоне стоковых фронтов — в непосредственной близости к берегу, а оставшаяся часть взвеси, сохраняя относительно устойчивое взвешенное состояние, переносится течением. Преобладающий южный и юго-западный ветер заблокировал перенос пресных вод с высоким содержанием взвеси к югу, что способствовало продвижению стоковых фронтов в восточном направлении (рис. 9, 10). Верхний слой (до 10 м) более подвержен ветровой нагрузке. Пространственное распределение взвеси в придонном слое (глубже 15 м) существенно отличалось от верхнего. Здесь взвесь распространяется двумя потоками, огибая остров Змеиный, при доминирующем влиянии южного потока. В целом про-

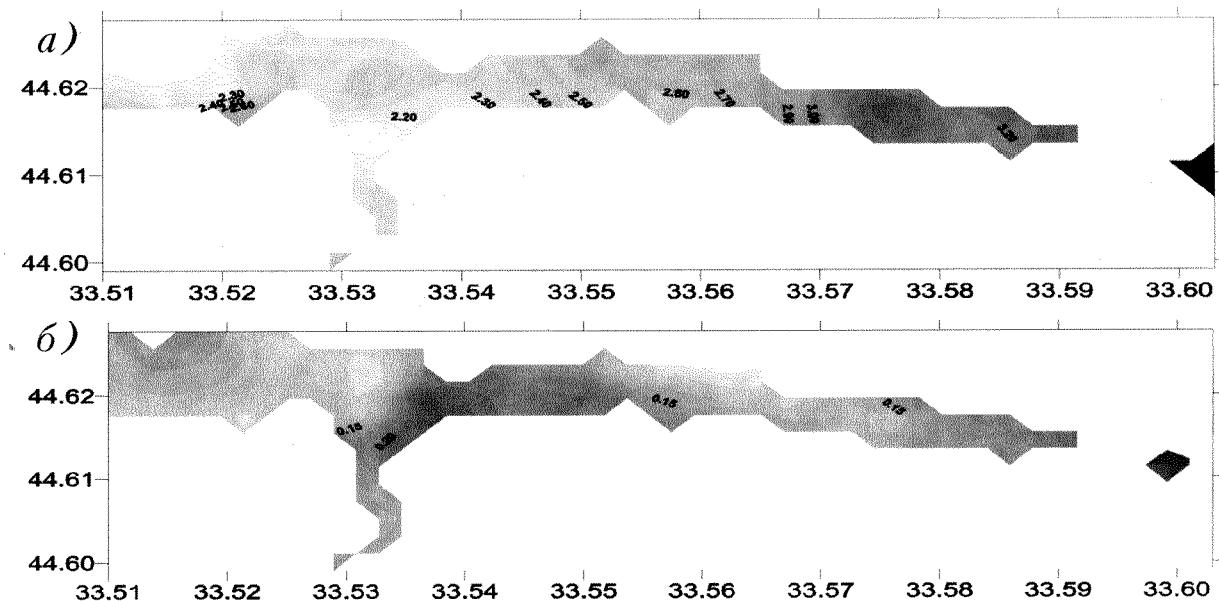


Рис. 12. Пространственное распределение концентрации взвешенного вещества Свв, мг/л (а) и растворенного органического вещества Сров, отн. ед. (б) в Севастопольской бухте (12.10.2000 г.)

странственное распределение как взвешенного вещества, так и растворенного органического вещества в верхнем и придонном слоях существенно различались между собой. Перестройка гидрологической структуры (с 8 по 17 октября) по данным космических снимков КС AVNRR ИСЗ NOAA сопровождалась разрушением неоднородности поверхностного распределения взвешенного вещества (рис. 11, а, б), и формированием к 21 октября (рис. 11, в), однородного слоя в районе исследования. По всем 20 станциям полигона отмечается взаимосвязь концентрации взвешенного вещества, рассчитанного по данным измерения спектральной прозрачности и плотности фототона космического снимка сканера AVHRR ИСЗ NOAA (0.725—1.1 мкм) за 08.10.1997 г. (коэффициент детерминации 0.86) (табл. 3). Причем наибольшее различие, за- вышение значения концентраций взвеси, отмечается в северо-восточной части полигона (станции 76, 77, 78), где по данным космических снимков (рис. 11, б) происходило фактическое увеличение взвеси.

Исследования в Севастопольской бухте выполнялись по плану исследований 2000—2001 гг. (05.08.2000, 12.10.2000, 17.07.2001) на судах «Профессор Вяземский» (ИНБЮМ НАН Украины) и «Порыв» (УкрНИГМИ). Севастопольская бухта соответствует требованиям тестового полигона с интенсивной антропогенной нагрузкой: пространственные масштабы — 2 × 8 км; многочисленность

Таблица 3. Концентрация взвешенного вещества и плотность фототона космического снимка КС AVNRR ИСЗ NOAA (0.725—1.1 мкм), 08.10.1997 г. район о. Змеиный

Номер станции	Концентрация взвеси, мг/л	Плотность фототона, отн. ед.	Номер станции	Концентрация взвеси, мг/л	Плотность фототона, отн. ед.
59	3.039	39.902	72	4.109	50.282
60	3.42	47.978	73	2.362	29.371
61	6.213	100	74	2.51	26.467
62	6.126	82.724	75	2.638	27.6
63	4.596	51.136	77	2.819	28.176
64	4.248	32.248	78	2.714	26.812
65	3.823	33.028	79	1.993	25.819
66	4.779	45.721	80	2.234	26.872
67	5.204	53.38	81	1.988	26.557
71	1.547	23.607	82	1.721	25.161

источников поступления загрязняющих веществ в бухту при доминировании одного из них (р. Черная); непосредственный выход в Черное море; зависимость водообмена от метеорологических условий; протяженная, используемая в хозяйственной деятельности береговая черта; используемая для судоходства и стоянки судов акватория бухты.

Оптические характеристики водной среды Севастопольской бухты имеют сложный характер, определяемый многочисленностью источников и различным фактором воздействия поступающих веществ. Малые глубины (до 25 м) и особенности

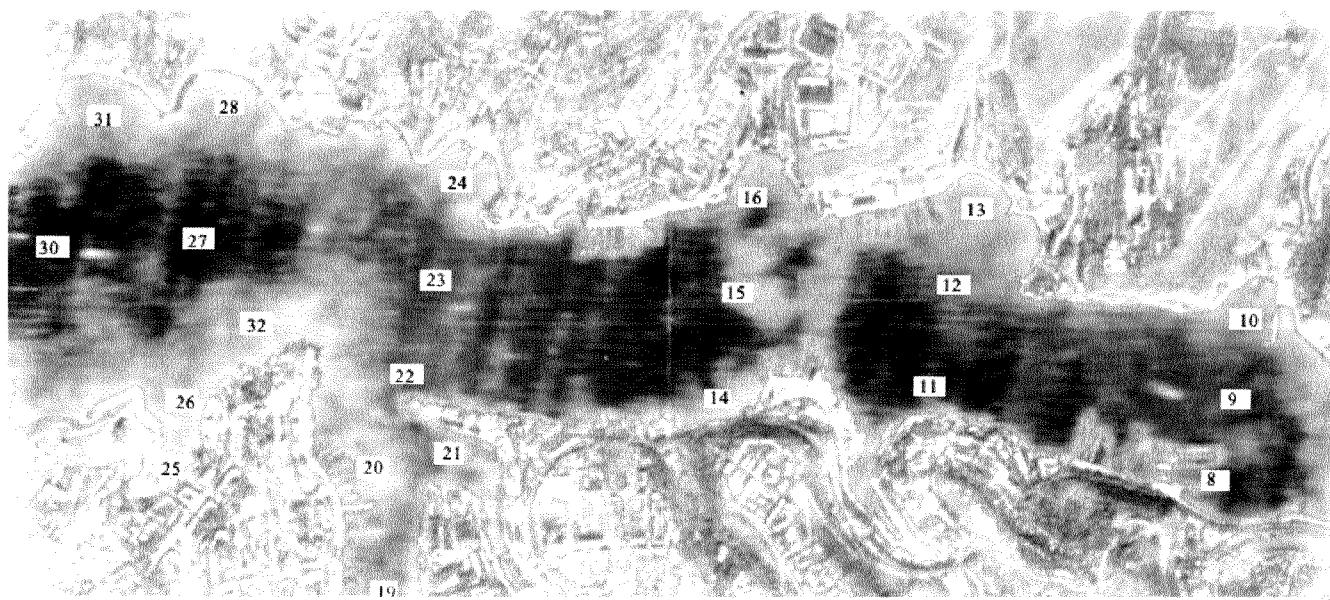


Рис. 13. Космический снимок КС LISS-3 ИСЗ IRS (панхром) района Севастопольской бухты

**Таблица 4.** Концентрация взвешенного вещества и плотность фототона космического снимка КС LISS-3 ИСЗ IRS (панхром) района Севастопольской бухты. 12.10.2000 г.

Номер станции	Концентрация взвеси, мг/л	Плотность фототона, отн.ед.	Номер станции	Концентрация взвеси, мг/л	Плотность фототона, отн.ед.
8	2.78	34.651	22	2.48	35.289
9	3.15	41.679	23	2.69	42.774
10	3.074	28.203	24	2.245	23.503
11	2.670	45.727	25	2.026	20.395
12	2.710	33.321	26	2.550	24.935
14	2.352	24.826	27	4.581	100
15	2.593	33.653	28	2.149	21.271
16	2.650	26.479	30	3.919	94.482
19	2.320	28.334	31	2.050	23.359
20	2.100	20.309	32	2.288	23.438
21	2.331	25.261			

рельефа берега приводят к значительной изменчивости пространственной структуры природных и антропогенных загрязнений, их быстрой перестройки в зависимости от интенсивности и направления ветра. Пространственное распределение концентрации взвешенного и растворенного органического вещества (рис. 12), характерно для северо-западного ветра (8—10 м/с). Использование данных КС ИСЗ типа NOAA или SeaWiFS для анализа акваторий, имеющих протяженную береговую черту и малые

пространственные масштабы, невозможно, потому что они соизмеримы или меньше пространственного разрешения космического сканера 1.1 км, и следовательно, погрешность, обусловленная береговой чертой, будет доминирующей. Космический снимок КС LISS-3 (12.10.2000 г.) охватил часть Севастопольской бухты (21 станцию из 31 стандартного полигона) (рис. 13). Сопоставление результатов наземных измерений концентрации взвешенного вещества (по спектральной прозрачности рис. 12, а) с плотностью фототона космического снимка показало удовлетворительное совпадение результатов этих измерений (табл. 4).

Кроме расчета концентраций взвешенного и растворенного органического вещества, был выполнен расчет концентрации хлорофилла, растворенных нефтепродуктов и интегральных загрязняющих веществ. В результате выявлено, что в водной среде есть целый спектр веществ, обусловленных антропогенным фактором. Эти вещества, наряду с природными, — растворенным органическим веществом, хлорофиллом, взвешенным веществом, имеют индивидуальные особенности спектральных характеристик поглощения.

Использование разработанных оптико-электронных измерительных систем для заверки результатов космических исследований позволит верифицировать данные космических измерений и открывает новые возможности для проведения мониторинга

прибрежной зоны морских акваторий на качественно новом уровне.

1. А. с. 1500855 СССР, МКИ Фотоприемное устройство / А. И. Чепыженко А. И. — Заявл. 10.06.87; Опубл. 15.04.89.
2. Ефименко И. Д., Пелевин В. Н. Угловое распределение яркости солнечного излучения в водах Индийского океана // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Индийском океане. — М.: Наука, 1975.—С. 124—132.
3. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. — Минск: Наука и техника, 1975.—503 с.
4. Оптика океана. — М.: Наука, 1983.—Т. 1.—357 с.
5. Пелевин В. Н. Об измерении показателя истинного поглощения света в море // Физика атмосферы и океана.—1965.—1, № 5.—С. 539—544.
6. Чепыженко А. И. Измерение спектральной подводной освещенности с помощью квантотметра // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ, 1999.—С. 118.
7. Chepyzhenko A. I. Optical methods and tools in a system ecological monitoring // Current Problems in Optics of Natural

Waters: ONW-2001. — St-Peterburg, Russia, 2001.—P. 323—328.

8. Chepyzhenko A. I., Haltrin V. I. A Submersible Probe to Measure Spectral Diffuse Attenuation and Diffuse Reflectance of Light by Natural Waters // Proceedings of the Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, 20-22 May, 2002, Miami, Florida, USA. — Published by: Veridian, P.O. Box 134008, Ann Arbor, MI 48113-4008, USA, 2002.—P. 1—5, paper N 00121.

---

#### OPTICAL SYSTEMS FOR SUBSATELLITE CALIBRATION OF RESULTS OF SPACE INVESTIGATIONS OF MARINE HARBOUR AREAS

##### A.I.Chepyzhenko

The devices designed for determining hydrooptical characteristics of marine areas are described. We give the results of a comparison of investigations of the marine areas in the regions of the Zmiinyi island and Sevastopol's'ka bay with space data for these regions.