

В.М.Кушнир, С.В.Федоров

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

**ОПТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ
В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ СЕВАСТОПОЛЯ
ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК**

Рассмотрены снимки гиперспектрального фотометра *HICO* и методы их обработки для учета влияния атмосферы и расчетов концентрации хлорофилла-*a* и взвеси. Сопоставление данных о концентрации хлорофилла-*a*, полученных двумя независимыми методами – на основе расчета отношения спектральных коэффициентов яркости водной толщи и эффективной длины волны – показали их соответствие с коэффициентом корреляции 0,8. Пространственное распределение концентрации взвеси вдоль основной бухты Севастополя по данным космических съемок совпадает по порядку величин и общей тенденции изменения вдоль бухты с результатами прямых измерений, выполненных в МГИ в период с 1998 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *гиперспектральный фотометр HICO, индекс цвета, эффективная длина волны, концентрация хлорофилла-а, концентрация взвеси.*

Новые возможности для исследований взаимосвязи экосистем суша-море открывает использование гиперспектральных космических съемок, на основе данных фотометра *HICO* (*The Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*) на Международной космической станции. Сейчас эти данные доступны для широкого круга специалистов по космическим съемкам и могут использоваться для решения многих проблем взаимосвязи земной и морской экосистем, геоинформационных технологий и различных приложений по этим и близким проблемам.

Фотометр *HICO* обеспечивает пространственное разрешение 100 м, спектральный диапазон измерений от 0,38 до 0,96 мкм с интервалом 0,0057 мкм, размер одного снимка 50 × 200 км.

Севастополь относится к числу крупных городов и транспортных портовых центров, вследствие чего его стоки влияют на качество прибрежных вод. С другой стороны, это зона активного освоения рекреационных ресурсов, о чем свидетельствуют массовые стройки санаториев, пансионатов, гостиниц и других объектов рекреации, главным образом, севернее Севастополя. Причем во многих случаях очистные сооружения этих объектов отсутствуют.

Характерной особенностью всех снимков являются контрасты между водной средой открытой части моря и прибрежными акваториями. Эти контрасты проявляются в севастопольских бухтах и вдоль береговой линии, причем их величины и конфигурация изменяется от снимка к снимку. Увеличение этих контрастов в бухтах Севастополя и, главным образом, в Северной (наибольшей) бухте, указывает на их связь со стоками города.

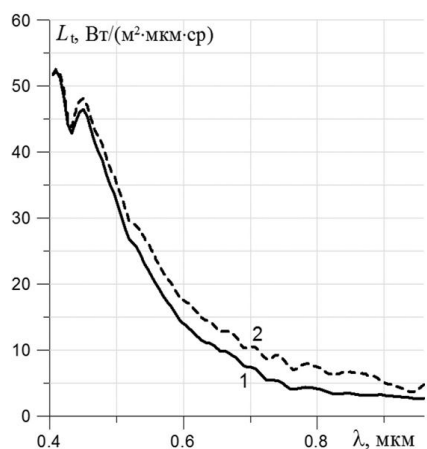
Указанные факторы свидетельствуют о необходимости экологического контроля качества прилегающих акваторий и мониторинга структуры стоковых вод, содержащих различные примеси. Одним из возможных путей решения проблемы является использование гиперспектральных съемок. На-

стоящая работа посвящена обоснованию одного из возможных методов обработки таких съемок и анализу получаемых при этом результатов.

Обработка данных гиперспектральных съемок. Прибрежные воды г.Севастополя относятся к водам 2-го типа, для которых необходимо создавать региональные алгоритмы обработки данных оптических спутников, в том числе и гиперспектральные данные *HICO* [1]. Один из возможных путей решения этой проблемы рассмотрен в настоящей работе. В качестве информационного параметра при обработке таких данных используется безразмерная величина *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) или индекс вегетации, вычисления которого выполняются по соотношению $NDVI = [L_i(IRED) - L_i(RED)] / [L_i(IRED) + L_i(RED)]$, где $L_i(IRED)$, $L_i(RED)$ – яркость, измеряемая бортовым фотометром в инфракрасной и красной частях спектра соответственно.

Этот параметр широко используется для регионального картирования и анализа различных экологически значимых характеристик земной поверхности [2 – 6]. Будучи безразмерной величиной *NDVI* показывает значительную корреляцию с биомассой, влажностью и минеральной (органической) насыщенностью почвы, испаряемостью (эвапотранспирацией), объемом осадков, мощностью и характеристиками снежного покрова. Расчет *NDVI* базируется на двух стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения растений. В красной области спектра (0,6 – 0,7 мкм) лежит максимум поглощения радиации хлорофиллом растений, а инфракрасная область (0,7 – 1,0 мкм) соответствует максимальному отражению клеточных структур растительности. Высокая фотосинтетическая активность, связанная с густой растительностью и обилием влаги, ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной, т.е. к увеличению *NDVI* при прочих равных условиях. Использование же нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких факторов как различие в освещенности снимка, облачность, дымка, поглощение радиации атмосферой, положение Земли относительно Солнца и пр.

Выполненные ранее исследования взаимодействия геоэкосистем суши и моря для северо-западной части Черного моря показали, что *NDVI* может использоваться в качестве экологического индикатора как для береговой $NDVI_L$, так и для прибрежной морской зоны $NDVI_w$ [7 – 9]. Оценки $NDVI_w$ для морской среды всегда отрицательны. Это объясняется тем, что фотометр измеряет, главным образом, величину яркости молекулярного и аэрозольного рассеяния атмосферы, которая убывает с увеличением длины световой волны. Поэтому $[L_i(IRED) - L_i(RED)] < 0$. При наличии оптически активных примесей в поверхностном слое моря яркость восходящего излучения увеличивается как в красной, так и в ИК части спектра. Однако из-за нелинейной зависимости обратного рассеяния частицами минеральной и органической взвеси от длины световой волны разность $L_i(IRED) - L_i(RED)$ уменьшается при увеличении концентрации взвеси и, следовательно, *NDVI* увеличивается в отрицательной области. Эта особенность проявляется в том, что при значительном удалении от берега для прозрачных вод величина $NDVI_w$ равна -0,5 – -0,6, а для мутных прибрежных вод она становится равной



Р и с . 1 . Типичные спектры яркости, ные фотометром *HICO* 22 сентября 2010 г. в открытом море (кривая 1) и вблизи берега (кривая 2). Для открытого моря $NDVI_W = -0,511$, для прибрежных вод $NDVI_W = -0,334$.

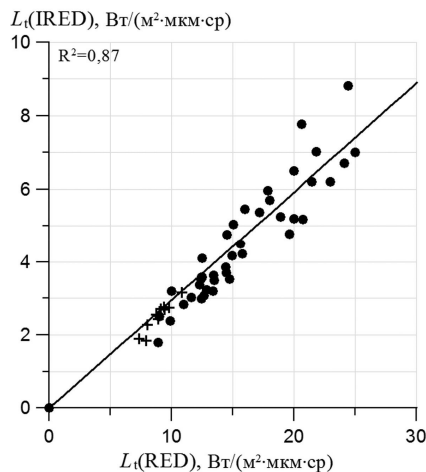
-0,4 – -0,3 и равна нулю при пересечении береговой линии. Для иллюстрации на рис.1 приведены спектры яркости, один из которых относится к прибрежным мутным водам, а другой – к водам открытого моря на расстоянии несколько десятков миль от берега.

Ранее, на основе данных оптических сканеров системы *MODIS* были исследованы особенности $NDVI_W$ для Черного моря, причем использовались длины волн 0,645 и 0,8585 мкм. Было установлено, что для прозрачных, точнее для условно прозрачных, вод открытого моря (глубина видимости белого диска 16 – 18 м, показатель ослабления $\epsilon(550 \text{ нм}) = 0,18 - 0,19 \text{ м}^{-1}$, концентрация хлорофилла-а 0,2 – 0,3 мг/м³, взвеси 0,3 – 0,4 г/м³) существует высокая корреляция между величинами яркости на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм. Так как в красной и ИК области спектра восходящее излучение морской поверхности для таких условно прозрачных вод практически отсутствует, фотометр спутника измеряет яркость $L_A(\lambda)$ молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере.

Полученная по данным фотометров *MODIS* и *HICO* зависимость $L_t(IRED) = f[L_t(RED)]$ приведена на рис.2, там же нанесена линия регрессии $L_t(IRED) = 0,31 \cdot L_t(RED)$. При этом, величина $NDVI_W$ равна – 0,5267, что соответствует наблюдениям.

С учетом вариаций приведенной зависимости минимальное значение $NDVI_W$ для условно прозрачной воды может с вероятностью 0,95 достигать –0,625. Большие значения $NDVI_W$ соответствуют увеличению концентрации хлорофилла-а и взвеси, а $NDVI_W = 0$ соответствует береговой линии.

Анализ зависимостей $L_t(\lambda) = f(NDVI_W)$ показал, что для рассматриваемых гиперспектральных съемок прибрежных акваторий Севастополя минималь-



ные значения фотометра соответствуют $NDVI_W = -0,55 - -0,6$ при удалении от берега порядка 10 миль. В красном – ИК диапазоне спектра восходящее излучение морской поверхности для такой воды практически отсутствует, показания фотометра определяются яркостью рассеяния в атмосфере. При этом их дисперсия соответствует инструментальной погрешности фотометра [10]. Это означает, что для каждой из рассматриваемых съемок

Р и с . 2 . Зависимости $L_t(IRED) = f[L_t(RED)]$: *MODIS* (•); *HICO* (+).

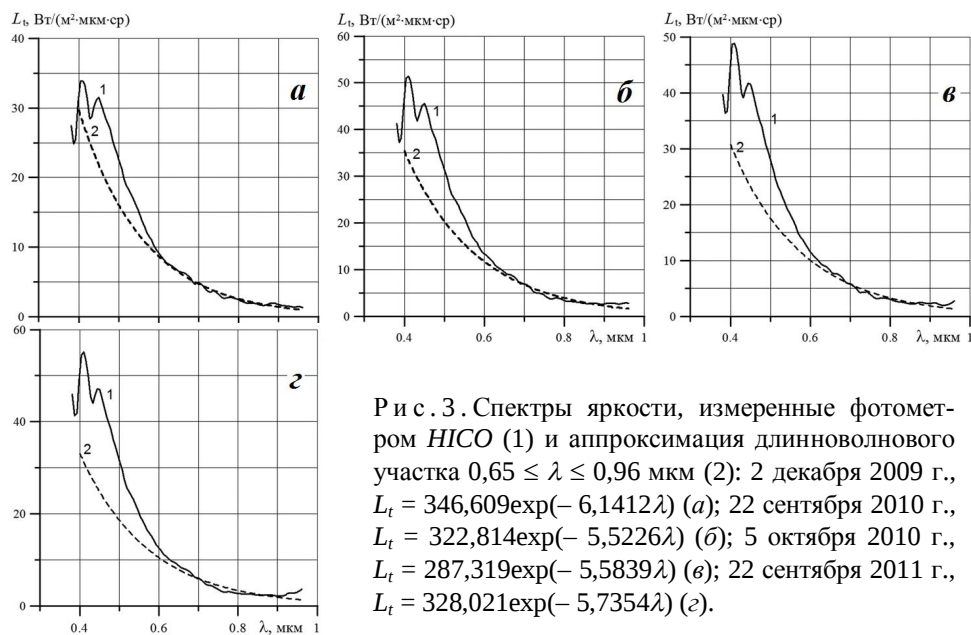
параметры аэрозоля практически неизменны, что также подтверждается данными проекта *AERONET*, обработанными в МГИ. Из этих данных следует, что масштаб пространственной корреляции параметров аэрозоля в Азово-Черноморском бассейне равен 160 км, что значительно превышает масштаб рассматриваемой прибрежной зоны [11].

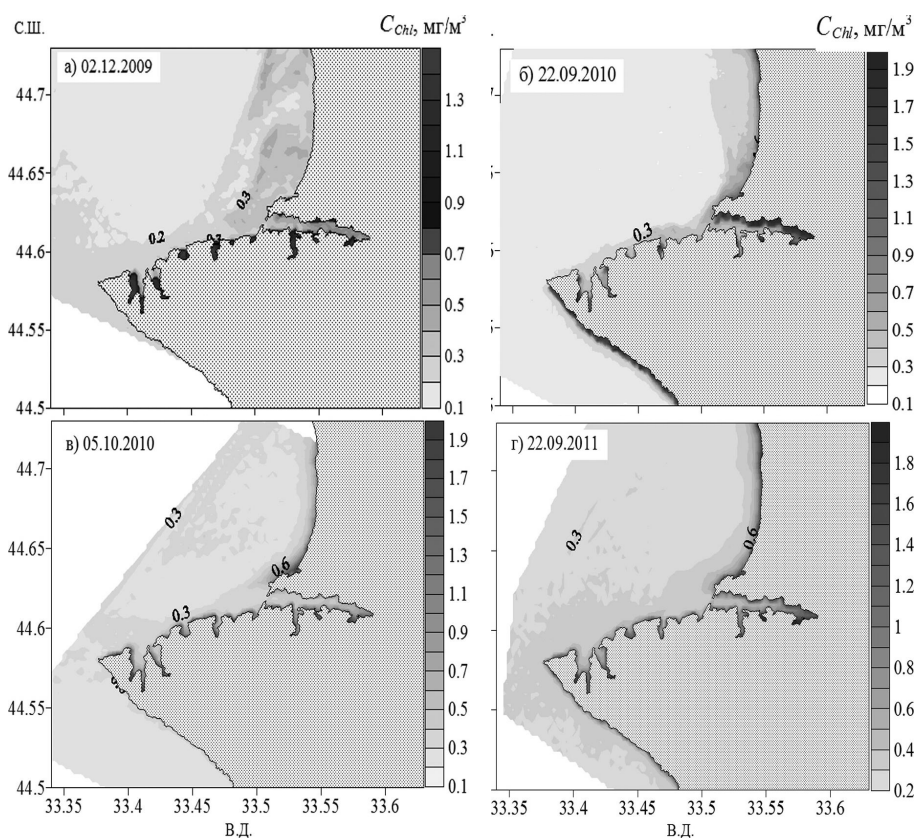
В длинноволновом участке спектра (0,65 – 0,96 мкм) имеется 54 значения измеренных величин яркости, которые позволяют получить достаточно хорошее приближение спектра яркости для рассматриваемых условно прозрачных вод и, по существу, являются величинами яркости аэрозольного и молекулярного рассеяния в атмосфере. Наилучшее приближение $L_{at} = f(\lambda)$ для этого участка спектра записывается в виде общего соотношения $L_{at} = A_i \exp(-B_i \lambda)$, параметры аппроксимации A_i , B_i для рассматриваемых съемок приведены ниже, а соответствующие зависимости показаны на рис.3. В качестве гипотезы мы можем рассматривать это приближение действительным для коротковолнового участка спектра, т.е. для $0,4 \leq \lambda \leq 0,65$ мкм, и, таким образом, для каждого пикселя исследуемой акватории определить яркость восходящего излучения морской поверхности по соотношению $L_w(x, y, \lambda) = L_t(x, y, \lambda) - L_{at}(\lambda)$.

Учитывая эти факторы, атмосферная коррекция показаний *HICO* выполнена при следующих допущениях:

1. Параметры аэрозоля для каждой съемки постоянны, что также подтверждается данными проекта *AERONET* [11].
2. Зоны с минимальным уровнем восходящего излучения морской поверхности ($NDVI = -0,55 - -0,60$) соответствуют параметрам воды с указанными выше минимальными концентрациями хлорофилла-*a* и примесей, и могут рассматриваться как зоны условно прозрачной воды.
3. Не рассматривается отражение от поверхности дна, так как глубины в указанных зонах прозрачной воды имеют порядок $10^2 - 10^3$ м.

Далее используется стандартное соотношение *NASA* для оценки концент-





Р и с . 4 . Пространственное распределение концентрации хлорофилла-а.

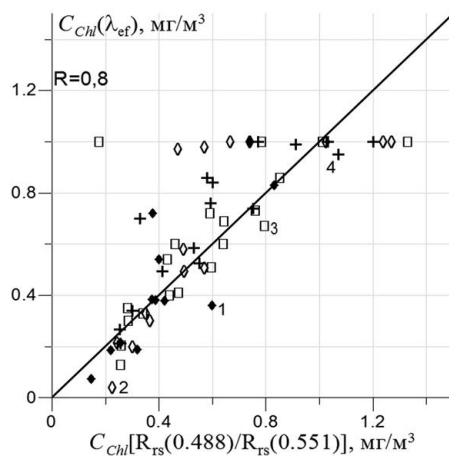
рации хлорофилла-а C_{Chl} для вод второго типа: $C_{Chl} = 10^{0,289-3,2X+1,2X^2}$, $X = \log[R_{rs}(0,488)/R_{rs}(0,551)]$, где $R_{rs}(0,488)/R_{rs}(0,551)$ – отношение спектральных коэффициентов яркости водной толщи для указанных длин волн (мкм) [12]. Полученные зависимости приведены на рис.4.

Видно, что наибольшие концентрации этого параметра наблюдаются в Северной бухте, там, где находится устье Черной речки, в других бухтах и в прибрежной зоне. При этом структура поля концентрации значительно меняется от снимка к снимку, что связано, очевидно, с действием многих факторов: изменением скорости ветра и, соответственно, прибрежных течений, вариацией источников взвеси и др.

Эффективная длина волны и ее связь с концентрацией хлорофилла-а. Учитывая особенности космических съемок фотометром *HICO*, в качестве информационного параметра для оценок концентрации взвеси, хлорофилла и некоторых оптических параметров целесообразно использовать эффективную длину волны λ_{ef} , которая вычисляется по соотношению [13]:

$$\lambda_{ef} = \frac{\int_{0,4}^{0,7} L_{wn}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{0,4}^{0,7} L_{wn}(\lambda) d\lambda},$$

где L_{wn} – яркость восходящего нормированного излучения поверхности моря; пределы интегрирования соответствуют видимой части спектра в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,7 мкм.



Р и с . 5 . Сопоставление оценок концентрации хлорофилла по данным об отношении спектральных коэффициентов яркости водной толщи и об эффективной длине волны: 2 декабря 2009 г. (1); 22 сентября (2) и 5 октября (3) 2010 г.; 22 сентября 2011 г. (4).

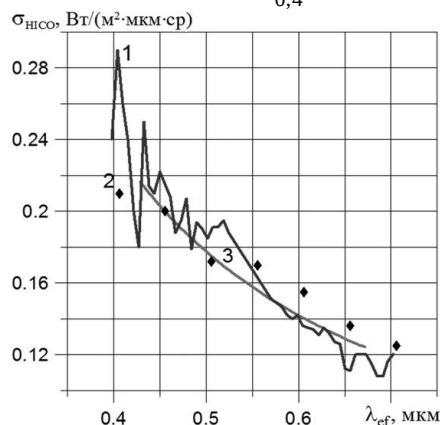
Для расчетов концентрации хлорофилла-*a* по эффективной длине волны известны различные эмпирические соотношения типа $\log C_{Chl} = a\lambda_{ef} - b$, где a , b – параметры. В настоящей работе на основе экспериментальных данных о концентрации хлорофилла в анализируемом районе принято, что $a = 7,65 \cdot 10^{-3}$, $b = 4,14$. Пространственное распределение концентрации хлорофилла-*a*, вычисленное по эффективной длине волны было в характерных точках сопоставлено с вычисленным ранее распределением этого параметра по отношению спектральных коэффициентов яркости водной толщи. Результаты сопоставления показаны на рис.5.

Видно, что за исключением отдельных точек $C_{Chl}(\lambda_{ef}) \approx 1 \text{ мг/м}^3$ наблюдается согласованность данных, что косвенно подтверждает достоверность результатов.

Оценка погрешности определения эффективной длины волны. Погрешность определения эффективной длины волны определяется уровнем шумов оптических каналов фотометра *NICO*, которые используются для вычисления λ_{ef} в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,7 мкм. На рис.6 представлены зависимости стандартного отклонения σ_{NICO} шумовой составляющей сигнала фотометра от длины волны по данным съемки акватории Южного берега Крыма и работы [10], а также линия регрессии для расчетов суммарной погрешности измерения. Видно, что между приведенными зависимостями имеется определенное соответствие.

С учетом указанных шумовых составляющих сигналов ξ_j фотометра величина эффективной длины волны равна:

$$\lambda_{ef} = \sum_{0,4}^{0,7} \lambda_j (L_{ws}(\lambda_j + \xi_j)) / \sum_{0,4}^{0,7} (L_{ws}(\lambda_j) + \xi_j), \quad (1)$$



Так как шумовые составляющие сигнала фотометра ξ_j являются независимыми случайными величинами, дисперсия погрешности числителя σ_c^2 и знаменателя σ_z^2 в соотношении (1) равны

Р и с . 6 . Зависимость стандартного отклонения шумовой составляющей сигнала фотометра *NICO* от длины волны: обработка данных съемки акватории прибрежной зоны (1); данные из работы [12] (2); линия регрессии $\sigma_{NICO} = 0,0877 \lambda^{-0,9821}$ с достоверностью 0,982 (3),

$\sigma_c^2 = \sum_{0,4}^{0,7} (\lambda_j \sigma_j)^2$, $\sigma_z^2 = \sum_{0,4}^{0,7} (\sigma_j)^2$ соответственно. Средние значения числителя и знаменателя для рассматриваемой съемки морской прибрежной зоны вычисляются по соотношениям $\langle x_c \rangle = \left\langle \sum_{0,4}^{0,7} (\lambda_j L_{ws}(\lambda_j) \Delta \lambda) \right\rangle$, $\langle x_z \rangle = \left\langle \sum_{0,4}^{0,7} L_{ws}(\lambda_j) \Delta \lambda \right\rangle$, где символ $\langle \dots \rangle$ означает осреднение по всем величинам x_c и x_z на акватории съемки фотометром *HICO*.

Двухмерная плотность распределения вероятностей числителя и знаменателя в соотношении (1) представлена в следующем виде:

$$W_{cz}(\xi_c, \xi_z) = \exp[-(\langle x_c \rangle - \xi_c)^2 / (2\sigma_c^2) - (\langle x_z \rangle - \xi_z)^2 / (2\sigma_z^2)] / (2\pi\sigma_c\sigma_z) = \\ = \exp[-0,5(\varepsilon_c^2 - 2\varepsilon_c\xi_c / \sigma_c + \xi_c^2 / \sigma_c^2) - 0,5(\varepsilon_z^2 - 2\varepsilon_z\xi_z / \sigma_z + \xi_z^2 / \sigma_z^2)] / (2\pi),$$

где $\varepsilon_c = \langle x_c \rangle / \sigma_c$, $\varepsilon_z = \langle x_z \rangle / \sigma_z$.

Плотность распределения вероятностей отношения $(\xi_c / \sigma_c) / (\xi_z / \sigma_z)$ вычисляется на основе известных соотношений для частного v двух случайных величин $\xi_c / \sigma_c = uv$, $\xi_z / \sigma_z = u$:

$$W(v) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{cz}(uv, u) |u| du = C_0 \int_{-\infty}^{\infty} |u| \cdot \exp[-0,5u^2(v^2 + 1)] \cdot \exp[u(\varepsilon_c v + \varepsilon_z)] du, \quad (2)$$

где $C_0 = \exp[-0,5(\varepsilon_c^2 + \varepsilon_z^2)] / (2\pi)$.

Интеграл (2) имеет следующее решение:

$$W(v) = 2C_0 \int_0^{\infty} u \exp(-\beta u^2) ch(\gamma u) du = 2C_0 \left[\frac{\gamma}{4\beta} \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \exp\left(\frac{\gamma^2}{4\beta}\right) \Phi\left(\frac{\gamma}{2\sqrt{\beta}}\right) + \frac{1}{2\beta} \right], \quad (3)$$

где $\beta = 0,5(v^2 + 1)$, $\gamma = \varepsilon_c v + \varepsilon_z$, $\Phi(z) = 2/\sqrt{\pi} \cdot \int_0^z \exp(-t^2) dt$.

Применительно к рассматриваемым условиям $\langle x_c \rangle = 0,265 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, $\langle x_z \rangle = 0,474 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$, $\varepsilon_c = 74,0$, $\varepsilon_z = 70,1$, $\sigma_c = 0,00358 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, $\sigma_z = 0,00676 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$.

Так как $\gamma / 2\sqrt{\beta} \gg 1$, $\Phi(\gamma / 2\sqrt{\beta}) \cong 1$, $\exp[-0,5(\varepsilon_c^2 + \varepsilon_z^2)] \ll 1$, соотношение (3) упрощается:

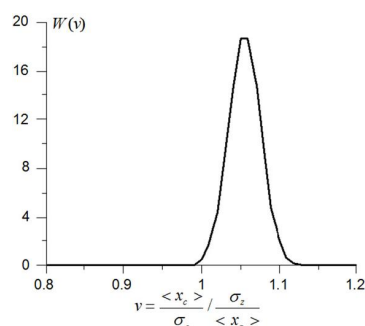
$$W(v) = \frac{v\varepsilon_c + \varepsilon_z}{\sqrt{2\pi}(1+v^2)^{1,5}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon_c - v\varepsilon_z)^2}{2(1+v^2)}\right].$$

Зависимость $W(v)$ показана на рис.7.

Дисперсия погрешности определения эффективной длины волны σ_λ^2 определяется по соотношению:

$$\sigma_v^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (v - \langle v \rangle)^2 W(v) dv = \left(\frac{\sigma_{\xi_c}}{\sigma_c} \right)^2 / \left(\frac{\sigma_{\xi_z}}{\sigma_z} \right)^2 = \sigma_\lambda^2 \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_c} \right)^2.$$

Стандартное отклонение погрешности σ_λ равно $\sigma_\lambda = \sigma_c(\sigma_c/\sigma_z)$. В рассматриваемом случае $\sigma_v^2 = 0,00043$, $\sigma_\lambda = 0,01096 \text{ мкм}$ или $10,96 \text{ нм}$. С вероятностью 0,95 погрешность Δ_λ определения эффективной длины волны равна $\pm 2\sigma_\lambda = \pm 21,92 \text{ нм}$, что составляет примерно 4 % от среднего значения эффективной длины волны (0,55 мкм).

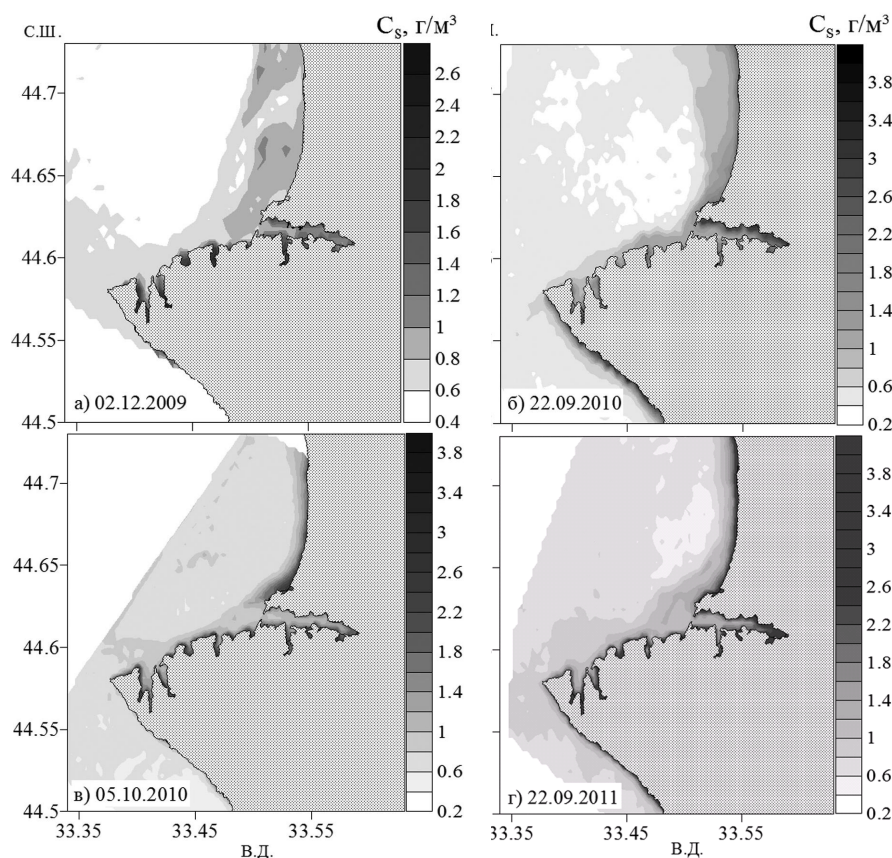


Р и с . 7. Вероятностное распределение оценки мированного значения эффективной длины волны.

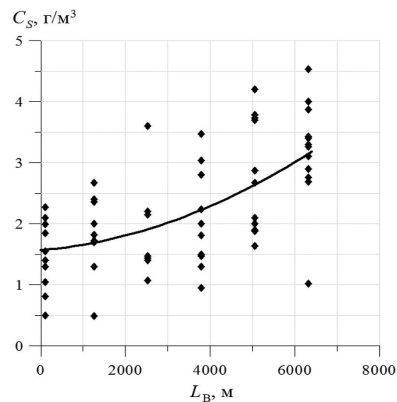
Концентрация взвеси. Соотношение для концентрации общего взвешенного вещества C_S , г/м³ были получены в результате обобщения многолетних исследований взаимосвязи этого параметра с индексом цвета $I_{wn}(440/550)$ [14]. Эмпирическое соотношение имеет следующий вид: $\log C_S = 0,4 - 0,88 \log [L_{wn}(440) / L_{wn}(550)]$, где $L_{wn}(\lambda)$ – нормализованная яркость восходящего излучения на длине волны λ .

Пространственные распределения C_S для прибрежных акваторий Севастополя показаны на рис.8.

Следует отметить значительную изменчивость этого параметра, которая, вероятно, объясняется многими факторами, основные из которых это изменение ветрового режима и «быстрая» перестройка поля скорости течения в прибрежной зоне и вариации городских стоков. Общей особенностью является увеличение концентрации взвеси в восточной (крайней) оконечности Северной бухты, куда впадает р.Черная, а на берегах расположенные многочисленные объекты производственной и хозяйственной деятельности. Здесь концентрация взвеси достигает 1,5 – 4,0 г/м³.



Р и с . 8. Пространственные распределения концентрации взвеси.



Р и с . 9 . Зависимость концентрации взвеси от расстояния L_B вдоль Северной бухты от выхода в море до устья р.Черная.

В период с 1998 г. по настоящее время Морской гидрофизический институт выполняет комплексные съемки акватории бухт Севастополя [15]. Хотя даты гиперспектральных съемок не совпадают с датами таких исследований, целесообразно сопоставить полученные двумя независимыми методами данные о пространственной структуре C_s по порядку полученных величин и по общей закономерности изменения концентрации взвеси вдоль бухты от выхода в море до восточной оконечности бухты – устья р.Черная. Такая зависимость представлена на рис.9. Видно, что средняя концентрация взвеси изменяется от 1,55 до 3,20 г/м³, что достаточно хорошо соответствует данным гиперспектральных съемок, приведенных на рис.9.

Выводы.

1. Показания фотометров *MODIS* и *HICO* в длинноволновых участках видимого спектра (0,65 – 0,85 мкм) для морских акваторий с указанными выше минимальными концентрациями хлорофилла-*a* и взвеси (условно прозрачная вода) имеют высокую корреляцию, равную $R = 0,94$. Так как яркость восходящего излучения от поверхности моря для этого диапазона спектра пренебрежимо мала, измеренные фотометром величины определяются яркостью молекулярного и аэрозольного рассеяния солнечного света в атмосфере. Среднее значение $NDVI_w$ при указанных условиях равно – 0,527 с возможными вариациями от – 0,5 до – 0,6. Для более коротковолновых компонент спектра 0,4 – 0,65 мкм значения $NDVI = -0,5 - -0,6$ соответствуют яркости атмосферного рассеяния и восходящего излучения от условно прозрачной воды.

2. Гиперспектральные космические снимки по данным фотометра *HICO* могут быть использованы для расчета эффективной длины волны λ_{ef} восходящего излучения, величина которой связана с концентрацией взвеси и хлорофилла, а также с основными гидрооптическими параметрами морской поверхности. В диапазоне длин волн от 0,4 до 0,7 мкм для этой цели используется 52 спектральных канала с пространственным разрешением 100 м.

3. Сопоставление данных о пространственной структуре концентрации хлорофилла-*a* по данным обработки гиперспектральных съемок различными методами показало, что, несмотря на отклонения отдельных данных от линии равных значений, в целом наблюдается соответствие сравниваемых величин в основном диапазоне изменчивости указанного параметра.

4. Оценка возможной погрешности определения эффективной длины волны λ_{ef} по данным гиперспектральных космических съемок выполнена на основе данных о соотношении полезный сигнал/шум в каждом оптическом канале и расчета плотности распределения вероятностей оценки λ_{ef} для морской акватории ЮБК и зоны, прилегающей к Севастополю. Расчеты показали, что стандартное отклонение инструментальной погрешности определения λ_{ef} со-

ставляют около 0,011 мкм или 2 % от среднего значения λ_{ef} , равного 0,55 мкм.

5. Анализ пространственных распределений концентрации взвеси по данным прямых измерений в севастопольской бухте и данных гиперспектральных съемок, выполненных в разное время, показал, что наблюдается соответствие по порядку величин этого параметра и воспроизводится закономерное увеличение концентрации взвеси при удалении от входа в бухту со стороны открытого моря, как по данным прямых измерений, так и по данным гиперспектральных съемок.

Исследование выполнено при поддержке проекта «Разработка методов и создание экспериментального образца биотехнической системы мониторинга шельфовых зон морей западной Арктики и Юга России, в том числе в районе Крымского полуострова на основе спутниковых и контактных данных» (шифр «2014-14-579-0115-020, RFMEFI60714X0059).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбакова И.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Вазюля С.В. Верификация спутниковых биофизических алгоритмов для Каспийского моря по судовым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2012.– т.9, № 4.– С.202-209.
2. Chen D., Brutsaert W. Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over a tallgrass prairie // J. Atmosph. Sc.– 1998.– \$55(7).– P.1225-1238.
3. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE T. Geoscience and Remote Sens.– 1995.– v.33, № 2.– P.481-486.
4. Jiang L., Tarpley J.D., Kenneth E.M., Zhou S., Kogan F., Guo W. Adjusting for long-term anomalous trends in NOAA's Global vegetation index data set // IEEE T. Geoscience and Remote Sens.– 2008.– v.46, № 2.– P.409-422.
5. Peters A.J., Eve M.D. et al. Analysis of desert plant community growth patterns with high temporal resolution satellite spectra // J. Applied Ecology.– 1997.– № 34.– P.418-432.
6. Ricotta C., Avena G. et al. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices // J. Photogrammetry and Remote Sens.– 1999.– № 54(5).– P.325-331.
7. Кушнир В.М., Коротаев Г.К., Коган Ф., Повел А. Взаимосвязь параметров береговой и морской среды северо-западной части Черноморского региона по данным мультиспектральных космических съемок // Исслед. Земли из космоса.– 2010.– № 4.– С.67-76.
8. Kushnir V., Kogan F., Korotaev G., Powell A. Predicting natural disasters in the coastal zone based on links between land and marine ecosystems // J. Geomatics, Natural Hazards and Risk.– 2010.– v.1, № 3.– P.185-197.
9. Kushnir V., Kogan F., Korotaev G., Powell A. Consequences of Land and Marine Ecosystems Interaction for the Black Sea Coastal Zone // NATO Science for Peace and Security: Environmental Security / Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability / Ed. Kogan K., Powell A., Fedorov O.– Springer Science Business Media B.V., 2011.– P.181-190.
10. Davis C.O., Bowles J., Leathers R.A., Korwan T. et al. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization and calibration // J. Optics express.– 2002.– v.10, № 4.– P.210-221.
11. Толкаченко Г.А. Исследования пространственных масштабов оптических неоднородностей аэрозоля над Черным морем // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2010.– вып.14.– С.83-88.

12. Morel A., Gentili B., Chami M., Ras J. Bio-optical properties of high chlorophyll Case 1 waters and of yellow-substance-dominated Case 2 waters // Deep-Sea Research I.– 2006.– 53.– P.1439-1459.
13. Маньковский В.И., Маньковская Е.В., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– 90 с.
14. Урденко В.А., Циммерман Г. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Т.2, часть 2.– Берлин: Изд-во Института космических исследований АН ГДР, 1987.– 197 с.
15. Коновалов С.К., Романов А.С., Моисеенко О.Г. и др. Атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 320 с.

Матеріал поступив в редакцию 08.12.2014 г.

АНОТАЦІЯ Розглянуто знімки гіперспектральних фотометра *HICO* і методи їх обробки для врахування впливу атмосфери і розрахунків концентрації хлорофілу-а і суспензії. Зіставлення даних про концентрацію хлорофілу-а, отриманих двома незалежними методами – на основі розрахунку відносини спектральних коефіцієнтів яскравості водної товщі та ефективної довжини хвилі – показали їх відповідність з коефіцієнтом кореляції 0,8. Просторовий розподіл концентрації суспензії уздовж основної бухти Севастополя за даними космічних зйомок совпадає по порядку величин і загальної тенденції зміни уздовж бухти з результатами прямих вимірювань, виконаних в МГІ в період з 1998 р.

ABSTRACT Space surveys of the Sevastopol city coastal waters carried out by the hyperspectral photometer *HICO* showed the significant brightness contrasts of the leaving radiation at wavelengths of 0,50 – 0,55 μm between the coastal zone and areas of the open sea. The methods of processing space surveys to account for the influence of the atmosphere and calculate the concentration of chlorophyll-*a* and suspension are considered. Comparison of data on the chlorophyll-*a* concentration obtained by two independent methods – based on the ratio of the brightness of the water column and the effective wavelength – showed their satisfaction with a correlation coefficient of 0.8. Spatial distribution of the suspension concentration along the main Sevastopol bay according to space surveys coincides in order of magnitude and overall trends in concentration along the bay according to direct measurements of this parameter carried out by Marine Hydrophysical Institute in the period of 1998 to the present time.