

УДК 551.465

## Оперативная оценка состояния прибрежных морских акваторий по данным пассивного оптического зондирования поверхности воды с борта судна

В.В. Ростовцева, И.В. Гончаренко, Б.В. Коновалов, А.Ф. Алюкаева\*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36*

Поступила в редакцию 10.07.2017 г.

При изучении экологического состояния прибрежных районов шельфа и внутренних морей часто необходимо оперативно получать достаточно подробные данные. В работе анализируются результаты измерений коэффициента спектральной яркости моря разработанным нами новым пассивным оптическим комплексом для экологического мониторинга морских акваторий, который работает в полуавтоматическом режиме на борту движущегося судна. Измерения проводились у побережья Бразилии в районе устья р. Рио-Гранде. Полученные спектры обрабатывались специальным методом водной адсорбционной «ступеньки», использующим свойства спектра поглощения света чистой водой, модифицированным специально для эвтрофных вод второго типа. Получены оценки показателей поглощения взвесью и окрашенным органическим веществом. Сравнение оценок, сделанных дистанционно и при обработке отобранных на станциях проб воды, показало высокую степень корреляции. По дистанционным данным были построены распределения взвеси и окрашенного органического вещества в исследуемой акватории и проведено сопоставление их со спутниковыми данными.

*Ключевые слова:* экологическое состояние морских акваторий, спектры коэффициента яркости моря, поглощение и рассеяние света морской водой, приустьевая акватория, концентрации взвеси и окрашенного органического вещества; ecological state of marine areas, spectra of the sea radiance coefficient, absorption and scattering of light by sea water, coastal sea water area at the river mouth, concentration of suspended matter and colored organic matter.

### Введение

Получение данных о состоянии прибрежных морских акваторий — важная практическая задача, поскольку прибрежные районы играют большую роль в жизни и хозяйственной деятельности людей. Свойства вод в таких районах чрезвычайно разнообразны и изменчивы, так как помимо взаимодействия с водами открытого моря они подвержены влиянию стока вод с суши и процессам перемешивания с донными осадками. Для оперативной оценки состояния вод наиболее эффективны методы, использующие связь состава воды с ее оптическими свойствами [1–5]. В последнее время большой объем информации дает оптическая аппаратура спутникового базирования [6, 7]. Однако в некоторых случаях ее пространственное и временное разрешение недостаточно. Проведению измерений мешает облачный покров. Для интерпретации спутниковых данных необходимо большое количество подспутниковых измерений.

Все это делает актуальным развитие неконтактных методов оперативной оценки состава поверхностных вод с борта перемещающегося судна.

Среди наиболее привлекательных методов оценки состава морской воды — пассивные оптические методы. Они не требуют больших энергозатрат, имеют хорошее спектральное разрешение и измеряют те же величины, что и спутниковая аппаратура [8–10]. Для получения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) морской поверхности с борта судна требуется измерять яркость восходящего от моря излучения, яркость участка неба, дающего наибольший вклад в отраженный от поверхности воды сигнал, а также оценивать общую освещенность поверхности моря. В предыдущей работе [11] мы продемонстрировали результаты, полученные одноканальным спектрометром, последовательно измерявшим все три сигнала. В настоящей статье приведены данные, которые получены разработанным нами новым полуавтоматическим трехканальным прибором.

Трехканальные спектрометры для оценки состояния прибрежных вод уже выпускаются несколькими ведущими зарубежными компаниями [12]. Например, портативный спектрометр WISP-3 фирмы Water Insight для единичных измерений коэффициента

\* Вера Владимировна Ростовцева (vera@ocean.ru);  
Игорь Владимирович Гончаренко (goncharenko@ocean.ru);  
Борис Васильевич Коновалов (bvkonvalov@yandex.ru);  
Алевтина Фридриховна Алюкаева (fridrihovna@ocean.ru).

яркости оператором с руки; он весит более 2 кг, имеет спектральное разрешение  $\sim 5$  нм в диапазоне  $350 \div 800$  нм. Для стационарной установки на борту судна предназначена аппаратура TriOS Ramses, собранная из трех датчиков фирмы TriOS Optical Sensors весом  $\sim 0,9$  кг, длиной около полуметра и имеющих 256 спектральных каналов каждый; передача измеренных данных осуществляется на бортовой компьютер посредством последовательного интерфейса RS-232. Еще один пример стационарной установки – аппаратура Surface Acquisition Systems фирмы Sea-Bird Scientific (Satlantic LP), включающая три спектрометра длиной  $\sim 40$  см и весом 1 кг каждый, которые измеряют оптический сигнал в диапазоне  $350 \div 800$  нм. Разработанный нами измерительный комплекс имеет меньшие весо-габаритные характеристики и позволяет вести измерения в полуавтоматическом режиме (вручную выставляется величина темнового тока, время интегрирования и ориентация прибора относительно направления на солнце до начала цикла измерений).

Как получаемые нашим трехканальными спектрометром КСЯ, так и измеряемые зарубежными спектрометрами спектры коэффициента отражения света водой ( $R_{rs}$ ) при дистанционном зондировании (величина  $R_{rs}$  отличается от КСЯ размерностью ( $ср^{-1}$ ) и постоянным коэффициентом) сильно зависят от условий наблюдения. Для преодоления этого обычно предлагается либо проводить измерения в условиях, близких к идеальным (высокий угол Солнца, штиль и безоблачное небо), что не всегда возможно, особенно в высоких широтах, либо исключать те измерения, которые получены при негоризонтальной ориентации платформы прибора и других особых условиях (иногда при этом теряется до 60% данных). Вместо этого мы использовали новый разработанный нами алгоритм, позволяющий калибровать спектры, опираясь на данные по поглощению и рассеянию света чистой морской водой (ВАСМ – метод водной адсорбционной «ступеньки») [13]. В данной работе предложенный алгоритм модифицирован для обработки вод с большим содержанием окрашенного органического вещества.

### Аппаратура для проведения натуральных измерений

Для проведения оперативной оценки состояния вод в прибрежных районах моря с борта движущегося судна мы создали комплекс экологического мониторинга морских акваторий (ЭММА). В комплексе ЭММА пассивные оптические измерения осуществляются тремя портативными малогабаритными спектрометрами серии STS фирмы Ocean Optics общим весом  $\sim 700$  г, размерами  $30 \times 20 \times 20$  см (рис. 1). Характеристики спектрометров:

- рабочий диапазон  $350 \div 800$  нм,
- спектральное разрешение 3 нм,
- отношение сигнал-шум 1500 : 1,
- разрешение матрицы 1024 точки,
- время интегрирования  $10^{-6} \div 10$  с.



Рис. 1. Полуавтоматический малогабаритный комплекс ЭММА для пассивных дистанционных оптических измерений с борта движущегося судна

Яркости моря и неба измеряются в двух каналах, в которые излучение попадает по оптоволокну с коллиматорной линзой (поле зрения  $\sim 5^\circ$ ). Угол визирования в канале моря выбирается так, чтобы избежать попадания в поле зрения пенных образований от движущегося судна ( $40\text{--}45^\circ$  от направления в нади́р); угол визирования в канале неба равен ему и отсчитывается от направления в зенит. В третьем канале используется оптоволокну с косинусным корректором, который позволяет оценивать общую освещенность горизонтальной поверхности. Для расчета КСЯ значение освещенности пересчитывается в величину яркости горизонтального белого отражателя с помощью коэффициента, полученного при калибровке прибора.

Измерения в каждом канале аппаратуры ЭММА проводятся в полуавтоматическом режиме с частотой 1 Гц. Результаты съемки сохраняются в базе данных управляющего компьютера как спектры, полученные от каждого из трех спектрометров, плюс координаты GPS/GLONASS каждую секунду. Прибор работает в непрерывном режиме в течение всего рабочего времени. Такие измерения с борта движущегося судна позволяют с хорошим разрешением ( $\sim 3$  м) получать геопривязанные массивы измеряемых параметров. Комплекс управляется компьютером, что дает возможность визуализировать производимые измерения в режиме реального времени и при необходимости оперативно принимать решение об изменении траектории движения судна, например для оконтуривания плюмов.

Массогабаритные характеристики и портативность комплекса позволяют использовать его на всех видах судов, включая маломерные лодки, что полезно в решении задач экологического мониторинга прибрежных акваторий.

Оценка КСЯ моря производится по трем измеренным спектрам:

$$R(\lambda) = (B_{\text{sea}}(\lambda) - rB_{\text{sky}}(\lambda)) / B_{\text{ws}}(\lambda), \quad (1)$$

где  $B_{\text{sea}}$  – яркость восходящего от моря излучения;  $B_{\text{sky}}$  – яркость сопряженного участка неба;  $r$  – коэффициент отражения Френеля, принимающий значение 0,02 в штилевую погоду при углах зондирования, близких к вертикали;  $B_{\text{ws}}$  – яркость белого отражателя, вычисленная по общей освещенности поверхности моря. Так как речь идет о зондировании морской поверхности с борта судна, поглощением и рассеянием света в воздухе можно пренебречь.

Далее полученные в процессе измерений спектры КСЯ обрабатываются с помощью специализированной программы, которая основана на предложенном нами методе ВАСМ, с целью получения оценок концентрации взвешенного вещества и окрашенного органического вещества в исследуемой акватории.

Для верификации полученных оценок по пути следования судна отбирались пробы воды, которые затем обрабатывались на мутномере 2100Q компании НАСН (Германия). Измерения осуществлялись в соответствии с протоколом EPA Method 180.1, в единицах NTU (Nephelometric Turbidity Unit) – нефелометрических единицах мутности по каолину (условная единица, основанная на эффекте рассеяния света в световом пучке мелкими взвешенными частицами). По указанному выше протоколу образцы воды из проб выдерживали в термостате и устанавливали их мутность, численно равную содержанию стандартных взвешенных частиц в миллиграммах на 1 л воды [14].

Кроме того, отобранные пробы фильтровали и оценивали концентрацию содержащихся в воде примесей по спектрам поглощения света [15].

## Модификация алгоритма ВАСМ для эвтрофных вод

В работе оригинальный метод обработки спектров КСЯ моря, измеренных с борта движущегося судна с помощью трехканального оптического комплекса ЭММА, модифицирован для эвтрофных вод. Метод учитывает особенности спектра поглощения света чистой водой. В результате его применения по спектрам коэффициента яркости могут быть восстановлены спектры поглощения морской воды и концентрации ее основных компонентов.

Необходимость модификации метода вызвана следующими соображениями. При его разработке для мезотрофных вод [13] было сделано предположение, что основное поглощение света в диапазоне длин волн  $>580$  нм обусловлено поглощением чистой морской водой, т.е. водой, не содержащей примесей, и неселективным поглощением взвесью. На рис. 2, а представлены спектры КСЯ, измеренные в акватории Черного моря с олиготрофными и мезотрофными типами вод. Все эти спектры имеют одинаковую особенность в виде «ступеньки» в диапазоне  $550 \div 650$  нм. При расчетах на первом этапе считалось, что «ступенька» обусловлена исключительно чистой водой. На следующем этапе алгоритма

ВАСМ итерационным методом с использованием значений КСЯ в более коротковолновой области спектра предлагалось оценить величину суммарного поглощения окрашенным органическим веществом. Однако величина поглощения указанной компонентой морской воды здесь была настолько мала, что не повлияла на общий характер спектров.

В эвтрофных водах ситуация меняется. Рассмотрим спектры КСЯ вблизи устья р. Рио-Гранде у побережья Бразилии (рис. 2, б).

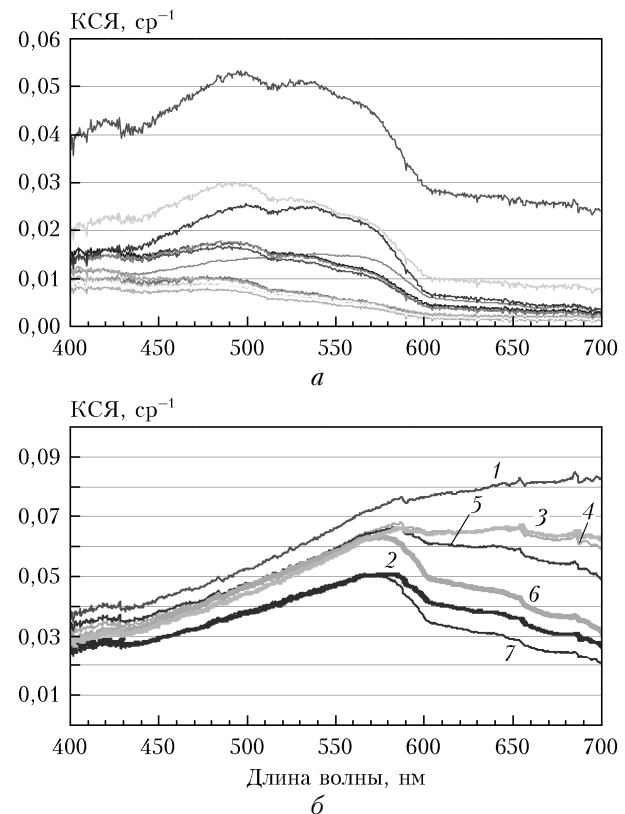


Рис. 2. Спектры КСЯ, полученные комплексом пассивного оптического зондирования ЭММА в олиготрофных и мезотрофных водах Черного моря (Феодосийский залив) (а) и в эвтрофных водах у побережья Бразилии (район устья р. Рио-Гранде) (б)

Видно, что спектры в эвтрофных водах сильно отличаются по форме, в частности «ступенька» становится более полой, а затем в более мутных водах (спектры 1, 3–5, рис. 2, б) уже полностью исчезает. Это означает необходимость на первом этапе алгоритма учитывать поглощение окрашенным органическим веществом. Оценить эту величину в эвтрофных водах можно исходя из следующих предположений.

В отличие от прозрачных вод в эвтрофных основной вклад в интенсивность восходящего от моря излучения вносит рассеянное толщей воды излучение, вклад отраженной от поверхности воды части мал (не более 10–15%). Поэтому и погрешность при оценке КСЯ, обусловленная погрешностью выбора участка неба, который дает наибольший вклад в отраженный сигнал, не велика. Тогда истинное значение КСЯ, отличающееся от измеренного, может быть вычислено по формуле

$$\rho(\lambda) = kR(\lambda) \quad (2)$$

( $k$  – неизвестный коэффициент, отличающийся от единицы при несинхронном изменении скачком общей освещенности или сигнала от поверхности из-за волнения). Учитываем, что в двухпотоковом приближении

$$\rho(\lambda) = \frac{k_0 b_b}{a(\lambda) + b_b}, \quad (3)$$

где  $b_b$  – показатель обратного рассеяния водной толщи (считаем его неселективным, так как молекулярное рассеяние в эвтрофных водах мало по сравнению с рассеянием на взвеси);  $k_0$  – некоторый постоянный коэффициент, определяемый пропусканием света через поверхность раздела водной и воздушной сред;  $a(\lambda)$  – показатель поглощения воды. Предполагаем, что в эвтрофных водах для  $\lambda > 500$  нм величина показателя поглощения определяется поглощением чистой водой ( $a_w(\lambda)$ ), неселективным поглощением взвесью ( $a_{sm}$ ), а также поглощением окрашенным органическим веществом ( $a_{com}$ ), состоящим из поглощения пигментами фитопланктона, детрита и «желтого вещества» и в этом диапазоне имеющим спектральную зависимость, сходную с «желтым веществом» ( $g = 0,015 \text{ нм}^{-1}$ ):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{com500} \cdot \exp\{-g(\lambda - 500)\} + a_{sm}. \quad (4)$$

Далее, выбирая три длины волны, характеризующие «ступеньку» (например, 540, 580 и 602 нм), и нумеруя их от коротких волн к длинным, из (1)–(4) получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_{w2} - \Delta_{21} + (a_{sm} + b_b) + a_{com500} \cdot e_1} = \frac{k}{k_0 b_b} \cdot R_1; \\ \frac{1}{a_{w2} + (a_{sm} + b_b) + a_{com500} \cdot e_2} = \frac{k}{k_0 b_b} \cdot R_2; \\ \frac{1}{a_{w2} + \Delta_{32} + (a_{sm} + b_b) + a_{com500} \cdot e_3} = \frac{k}{k_0 b_b} \cdot R_3, \end{cases} \quad (5)$$

где  $R_i$  – измеренное на длине волны  $\lambda_i$  значение КСЯ;  $\Delta_{21} = a_{w2} - a_{w1}$ ,  $\Delta_{32} = a_{w3} - a_{w2}$  – величина «ступеньки», обусловленной поглощением чистой водой;  $e_i = \exp\{-g(\lambda_i - 500)\}$ .

Решая эту систему, получаем оценку показателя поглощения окрашенным органическим веществом на длине волны 500 нм ( $a_{com500}$ ), оценку суммы показателей поглощения и рассеяния на взвеси ( $a_{sm} + b_b$ ), а также коэффициент  $k/k_0 b_b$ , с помощью которого могут быть рассчитаны спектры показателя поглощения примесей и самой воды (рис. 3).

Видно, что поглощение примесями в районе устья р. Рио-Гранде в несколько раз превосходит поглощение света чистой водой и имеет в длинноволновой области спектра экспоненциально-убывающий характер, как это и предполагалось. Кроме того, характерная «ступенька» в спектрах КСЯ проявляется только в тех водах, где величина подъема

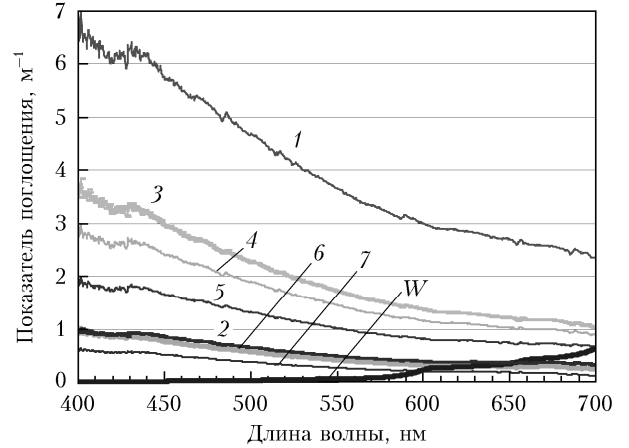


Рис. 3. Спектры показателей поглощения примесей, рассчитанные по измеренным КСЯ с применением предложенного алгоритма ВАСМ, и спектр показателя поглощения света чистой водой (кривая W)

в спектре поглощения водой в диапазоне 580 ÷ 600 нм превосходит величину уменьшения поглощения в спектре примесей.

Результаты расчета показателя поглощения окрашенным органическим веществом на длине волны 500 нм и суммы показателей поглощения и рассеяния на взвеси для изображенных на рис. 2, б спектров КСЯ приведены в таблице. Следует отметить, что для рис. 2 и 3 выбраны те спектры, которые были рассчитаны по измерениям, сделанным в то же время, когда отбирались пробы воды на станциях (их номера совпадают с номерами станций на рис. 5).

**Результаты расчета суммы показателей поглощения и рассеяния на взвеси ( $a_{sm} + b_b$ ) и показателя поглощения окрашенным органическим веществом на длине волны 500 нм ( $a_{com500}$ )**

№ станции	Показатель поглощения	
	$a_{sm} + b_b, \text{ м}^{-1}$	$a_{com500}, \text{ м}^{-1}$
1	2,40	2,66
2	0,275	0,42
3	1,04	1,42
4	0,89	1,19
5	0,63	0,82
6	0,23	0,39
7	0,14	0,26

Для верификации результатов оценки по данным дистанционных измерений с борта судна в это же самое время были взяты пробы воды с поверхности. Пробы были проанализированы на мутномере, откалиброванном на концентрацию взвеси  $K_{sm}$  в мг/л. Далее была проведена фильтрация и измерены спектры поглощения света на фильтрах. Концентрация минеральной взвеси оценивалась как поглощение на 750 нм в единицах поглощения ( $\text{м}^{-1}$ ), концентрация пигментов фитопланктона и детрита оценивалась как разность полного поглощения на 680 нм (красный максимум поглощения хлорофилла  $a$ ) и поглощения взвесью. Результаты сравнения этих

оценок с дистанционными измерениями приведены на рис. 4.

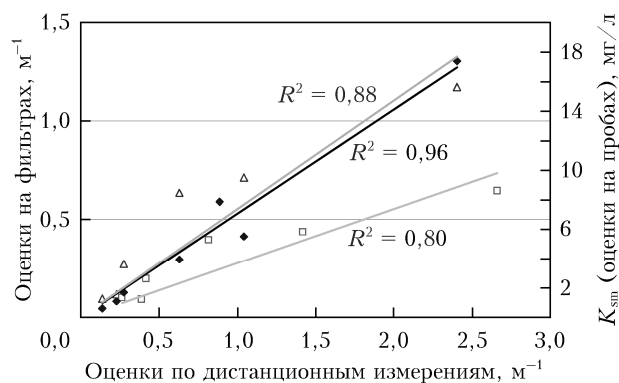


Рис. 4. Сравнение оценок концентрации взвеси ( $a_{sm} + b_b$ ) по дистанционным измерениям комплексом ЭММА с оценками поглощения взвесью на фильтрах на  $\lambda = 750$  нм ( $\Delta$ ), а также с данными, полученными мутномером на пробах воды ( $\blacklozenge$ ). Сравнение оценок показателя поглощения окрашенным органическим веществом ( $a_{com500}$ ), вычисленных по дистанционным измерениям, с оценками поглощения фитопланктоном, получаемых по разности поглощения на  $\lambda = 680$  и  $750$  нм на фильтрах ( $\square$ )

Оценки концентрации взвеси по дистанционным измерениям хорошо коррелируют с оценками по поглощению на фильтрах, однако значения первых выше, так как дистанционно оценивается средняя по слою концентрация, а не только на поверхности воды. Кроме того, в оценку входит показатель обратного рассеяния света на взвеси. Измерения на пробах мутномером, очевидно, также зависят как от поглощения, так и от рассеяния света, поэтому корреляция с оценками по дистанционным измерениям здесь еще выше. Вдобавок было проведено сопоставление показателей поглощения окрашенным органическим веществом, полученным по измерениям комплекса ЭММА, и поглощения на фильтрах на  $\lambda = 680$  нм, соответствующим красному пику поглощения хлорофилла *a*. В этом случае корреляция также достаточно высока.

## Обсуждение результатов

Высокая корреляция оценок концентрации взвеси, полученных с помощью комплекса ЭММА по дистанционным измерениям, и оценок, полученных при обработке взятых проб воды двумя стандартными методами, позволяет сделать вывод о высокой эффективности работы новой аппаратуры и методов обработки результатов ее измерений.

К настоящему времени нами предложено и апробировано две модификации метода, основанного на особенностях поглощения света чистой морской водой. В [13] при обработке результатов измерений КСЯ олиготрофных и мезотрофных вод мы на первом шаге считали, что в красной части спектра поглощение обусловлено в основном чистой водой и серой взвесью, и только потом с помощью одной или нескольких итераций оценивали показатель поглощения окрашенного органического вещества. Та-

кой подход для эвтрофных вод оказался невозможным, так как поглощение окрашенной органикой здесь сильно влияет на форму спектров КСЯ. Поэтому в данной работе мы модифицировали ВАСМ: по значениям КСЯ для трех длин волн в красной области спектра сразу оценивается показатель поглощения окрашенным органическим веществом и с его помощью получается показатель поглощения взвесью. Это возможно благодаря тому, что в эвтрофных водах яркость восходящего от моря излучения, обусловленная в основном обратным рассеянием на взвеси, намного превосходит отраженный поверхностью свет от небосклона. В этих условиях погрешностью, сдвигающей спектр КСЯ при измерении яркости соседнего с нужным участка небосклона, можно пренебречь.

Измеренные значения показателей поглощения окрашенным органическим веществом и поглощения взвесью позволяют рассчитать спектры поглощения исследуемых вод во всем диапазоне используемых длин волн и по ним оценить концентрацию пигментов фитопланктона и «желтого вещества» по методике, представленной в [11]. В настоящей статье эти расчеты не представлены, но была обнаружена довольно высокая корреляция оценки концентрации окрашенного органического вещества с оценкой концентрации пигментов фитопланктона по красному пику поглощения хлорофилла *a*. Это означает, что концентрация растворенного «желтого вещества» в исследуемых водах у побережья Бразилии пропорциональна концентрации фитопланктона, как в водах открытого океана.

По данным, полученным с помощью комплекса пассивного дистанционного зондирования ЭММА, были построены распределения концентрации взвеси и окрашенного органического вещества (рис. 5, цв. вкладка). На рисунке показан маршрут следования судна и места станций, где отбирались пробы. Значения концентрации взвеси (в мг/л) откалиброваны по семи станциям. Распределения построены по большому числу (~20000) измеренных значений концентрации взвеси и показателя поглощения окрашенного органического вещества стандартным методом (method of natural neighbor). Они наложены на изображение, полученное в тот же день гиперспектральной аппаратурой российского спутника Ресурс-П. Видно, что оба распределения хорошо совпадают со спутниковой картинкой, хотя и имеют свои особенности.

## Заключение

Исследования, проведенные в эвтрофных водах у побережья Бразилии, показали высокую эффективность работы нового оптического комплекса ЭММА. С его помощью можно проводить оперативный мониторинг прибрежных районов морей, характеризующихся большими градиентами концентраций природных примесей и высокой временной изменчивостью, например районов впадения в море крупных рек. Благодаря тому, что новый комплекс дает большой объем информации о величине и распределении

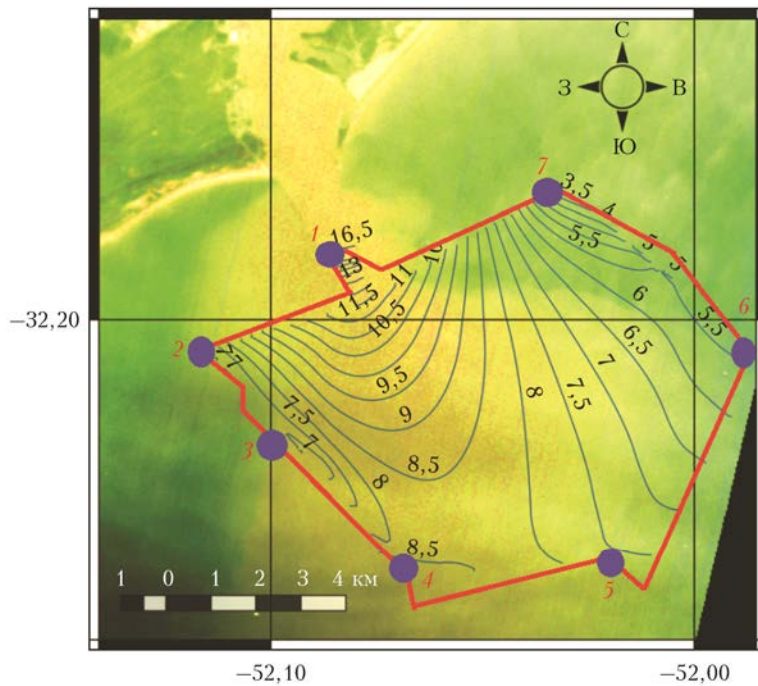
различных природных примесей по водной акватории, он может также эффективно использоваться при подспутниковых измерениях.

Работа выполнялась при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.613.21.0050, идентификатор RFMEFI61315X0050).

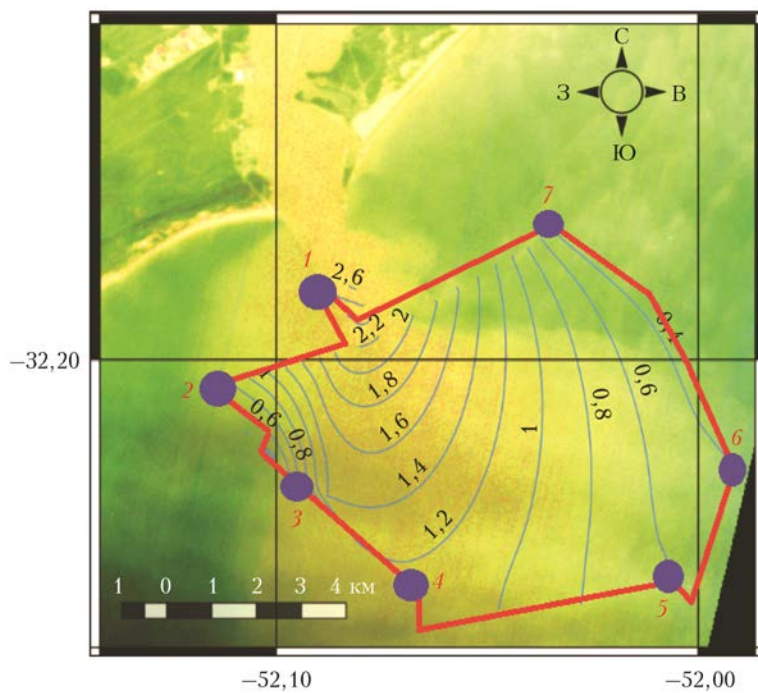
1. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22, N 4. P. 709–722.
2. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана // *Явления на поверхности океана* / под ред. А.С. Мониной, В.П. Красицкого. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 318–329.
3. Bowers D.G., Binding C.E. The optical properties of marine suspended particles: A review and synthesis // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 2006. V. 67. P. 219–230.
4. Шаманаев В.С. Самолетные лидары ИОА СО РАН для зондирования оптически плотных сред // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 3. С. 260–266; *Shamanev V.S. Airborne lidars of the IAO SB RAS for sensing of optically dense media* // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 359–365.
5. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Лидарные и *in situ* измерения оптических параметров поверхностных слоев воды в озере Байкал // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 5. С. 377–385; *Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Penner I.E., Shamanev V.S. Lidar and in situ measurements of the optical parameters of water surface layers in Lake Baikal* // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 5. P. 478–486.
6. Mouw C.B., Greb S., Aurin D., DiGiacomo P.M., Lee Z.-P., Twardowski M., Binding C., Hu C., Ma R., Moore T., Moses W., Craig S.E. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 160. P. 15–30.
7. Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шербетов С.В. Цветение кокколитофорид в Баренцевом море – спутниковые и судовые наблюдения // *Океанология.* 2011. Т. 51, № 5. С. 1–9.
8. Матюшенко В.А., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Измерение коэффициента яркости моря трехканальным спектрофотометром с борта НИС // *Оптика атмосфер. и океана.* 1996. Т. 9, № 5. С. 664–669.
9. Mobley C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Appl. Opt.* 1999. V. 38, N 36. P. 7442–7455.
10. Palmer S.C.J., Kutser T., Hunter P.D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 157. P. 1–8.
11. Ростовцева В.В., Коновалов Б.В., Гончаренко И.В., Хлебников Д.В. Способ оценки содержания примесей в морских водах с помощью оперативной спектрофотометрии // *Океанология.* 2017. Т. 57, № 4. С. 560–574.
12. Hommersom A., Kratzer S., Laanen M., Ansko I., Ligi M., Bresciani M., Giardino C., Beltrán-Abaunza J.M., Moore G., Wernand M., Petersen S. Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS) // *J. Appl. Remote Sens.* 2012. V. 6, N 1. P. 063615-1–063615-21.
13. Ростовцева В.В. Метод получения спектров поглощения морской воды по данным пассивного дистанционного зондирования с борта судна с использованием свойств чистой воды // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1003–1011; *Rostovtseva V.V. Method for sea water absorption spectra estimation on the basis of shipboard passive remote sensing data and pure sea water properties* // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 162–170.
14. URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/201508/documents/method\\_180-1\\_1993.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/201508/documents/method_180-1_1993.pdf) (last access: 17.05.2017).
15. Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 5. С. 704–711.

**V.V. Rostovtseva, I.V. Goncharenko, B.V. Konovalov, A.F. Alukaeva. Operative estimation of ecological state of coastal sea aquatories using passive optical remote sensing of water surface from board a ship.**

Study of ecological state of marine coastal regions often requires operative acquisition of detailed data. In this work, the measurements of the sea radiance coefficient spectra are analyzed, which were made with a new three-channel passive optical complex for ecological monitoring of marine aquatoria (EMMA) developed by us, which operates semiautomatic from board a moving ship. The measurements were carried out at the Brazilian coast in the area of the Rio Grande river mouth. The spectra obtained were processed using an original technique based on intrinsic properties of the pure sea water absorption spectrum (WASM – water absorption step method) modified for the eutrophic type II waters. This enables us to estimate the absorption indices of the suspended matter and colored organic matter. The comparison of these remote estimates with the estimates retrieved from the water samples taken at special stations shows their high correlation. Using remotely obtained data the distributions of the suspended matter and colored organic matter were constructed and compared to the satellite image in the aquatory under exploration.



*a*



*б*

Рис. 5. Распределения концентрации взвеси в мг/л (*a*) и окрашенного органического вещества в  $m^{-1}$  (*б*), полученные по данным дистанционных измерений комплексом ЭММА с борта судна, движущегося по маршруту 1–7. Кружками обозначены станции взятия проб. Оба распределения наложены на изображение, полученное в тот же день гиперспектральной аппаратурой российского спутника Ресурс-П у побережья Бразилии в районе устья р. Рио-Гранде