

**О.А. Букин\*\***, **М.С. Пермяков\***, **А.Н. Павлов\***, **А.Ю. Майор\***, **А.В. Малеев\***,  
**Т.И. Тархова\***, **Г.В. Скороход\*\***, **Д.А. Акмайкин\*\***

## **Использование пассивно-активных методик оптического зондирования для измерения структурных особенностей распределения биооптических характеристик в верхнем слое океана**

*\*\* Дальневосточная государственная морская академия им. Г.И. Невельского,  
\* Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток*

Поступила в редакцию 30.05.2000 г.

Одной из задач дистанционного зондирования океана является нахождение характерных структур в распределении биооптических характеристик верхнего слоя океана. Пассивные методы определения цвета морской поверхности позволяют в некоторых случаях решать эти задачи, однако влияние многих факторов приводит к тому, что величина отношения сигнала к шуму при этих измерениях не позволяет с хорошей достоверностью выделять подобные структуры. В данной работе проводится параллельная статистическая обработка полей концентраций хлорофилла «А», полученных одновременно со спутника SeaWiFS и судовым лазерным флуориметром в Тасмановом море. Показано, что в обоих случаях наблюдаются характерные масштабы в распределении хлорофилла, связанные с внутренними масштабами России.

Известно, что во многих случаях информация, полученная при дистанционном зондировании океана с использованием оптических активных методов (в основе своей лазерных методов) зондирования, является более достоверной, чем при использовании пассивных методик. В связи с этим понятно стремление использовать лазерные методики в качестве калибровочных, подспутниковых измерений [1–3] для повышения точности существующих пассивных методов и расширения их возможностей. Так, для анализа структуры полей различной физической природы и выделения в них характерных структурных образований с помощью статистической обработки данных дистанционного зондирования со спутников необходимо проведение аналогичных процедур обработки результатов судовых измерений для более однозначной интерпретации спутниковых данных. Это относится и к биооптическим характеристикам морской воды. Формирование структур с характерными масштабами в распределении биооптических характеристик морской воды приводит к соответствующему структурированию полей фитопланктона и вызвано очень сложным взаимодействием гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов, протекающих в фотическом слое океана.

В настоящей статье приводятся результаты статистической обработки полей концентрации хлорофилла «А», полученных при пассивном зондировании цвета морской поверхности со спутника SeaWiFS и активном зондировании с судна. Целью такого статистического анализа данных являлось обнаружение характерных структур в распределении биооптических характеристик (хлорофилла «А») в верхнем слое океана. Сам факт образования характерных структур в пространственном распределении хлорофилла «А» может быть вызван различными причинами, однако возможность регистрации подобных структур с использованием дистанционных методик является крайне необходимой для решения широкого круга задач в океанологии.

Для статистической обработки были использованы данные дистанционного зондирования цвета морской поверхности, проведенного со спутника SeaWiFS [4], и одно-временных измерений концентрации хлорофилла «А», проведенных с борта парусного учебного судна (ПУС) «Надежда» с использованием лазерного флуориметра [5].

Район работ в Тасмановом море, где были получены анализируемые данные, приведен на рис. 1. На рисунке показана часть полосы сканера SeaWiFS, сделанная 10.02.1998 г. Серым цветом обозначены пиксели, в которых восстановлена концентрация хлорофилла «А», остальная площадь (обозначенная белым цветом) в этот период была закрыта облаками.

В кружке показана область с частью маршрута ПУС «Надежда», которым оно следовало 10.02. 1998 г. в промежутке между 11.00 и 14.00 местного времени. Измерения спектров флуоресценции проводились непрерывно по ходу судна в указанном интервале времени, при этом обеспечивалось пространственное разрешение 240 м.

Исходными для обработки данными являлись значения концентраций хлорофилла, полученные со сканера SeaWiFS, усредненные в квадратах размером примерно  $8 \times 8$  км, и значения концентрации хлорофилла «А», измеренные по ходу судна лазерным флуориметром (рис. 2). Район измерений приведен в увеличенном масштабе, а соответствующая гистограмма значений концентрации хлорофилла «А» получена по всем квадратам, находящимся в районе, указанном на рис. 2, а. Максимум распределения приходится на значение концентрации хлорофилла примерно 0,4 мкг/л. На рис. 3 приведены распределение концентрации хлорофилла «А» по данным лазерной флуориметрии вдоль маршрута судна и гистограмма концентрации хлорофилла, построенная по этим измерениям. В последней выделяются две группы значений характерных для двух кластеров точек на рис. 2, а. Такое различие гистограмм 2, б и 3, б можно, по-видимому, объяснить различием в масштабах пространственных усреднений (хотя средние значения концентраций близки).

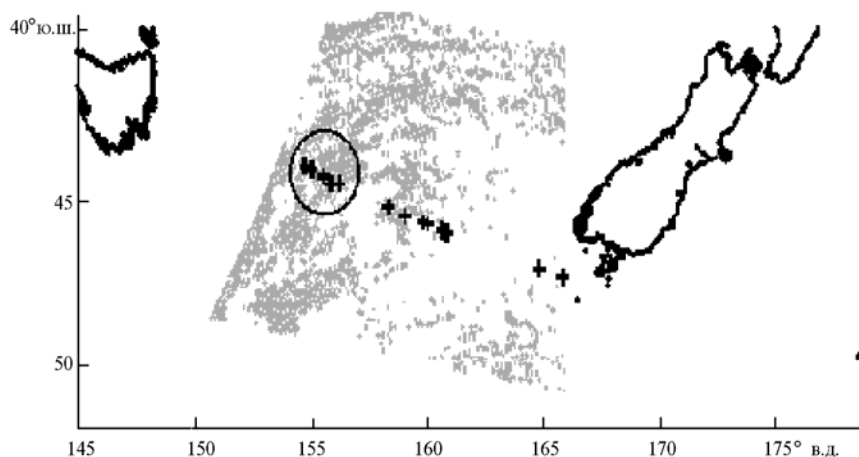


Рис. 1. Снимок SeaWiFS с маршрутом ПУС «Надежда»

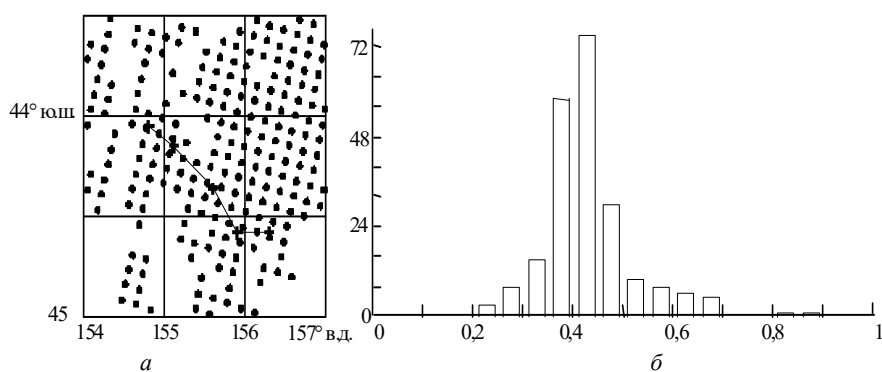


Рис. 2. Район измерения (а); гистограмма концентраций хлорофилла (б); по горизонтальной оси концентрация хлорофилла, мкг/л, по вертикальной – число измерений с данной концентрацией

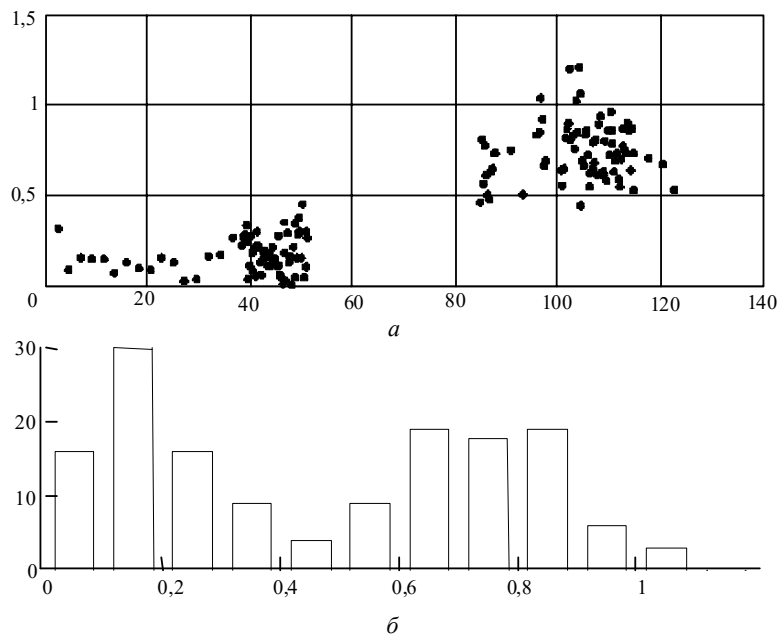


Рис. 3. Измерения по данным лазерной флуориметрии (а), по вертикальной оси – значения концентраций, мкг/л, по горизонтальной оси – расстояние вдоль маршрута судна, км; б – гистограмма концентрации хлорофилла (обозначения по осям те же, что и для рис. 2, б)

Оценки статистических характеристик проводились по известным алгоритмам, здесь отметим лишь некоторые важные, на наш взгляд, методические особенности, связанные с

ограниченностью выборок, пространственно-временной изменчивостью и погрешностью данных. Расчеты корреляционных функций проводились через статистические оценки

структурных функций, что является предпочтительным в условиях, когда однородность случайного поля является лишь приближенной, а при измерениях возможны систематические ошибки [6, 7]. При этом усреднение проводится в перекрывающихся градациях расстояний между точками измерений (и градациях угла для анизотропного поля), что позволяет увеличить число интервалов осреднения и уменьшить дисперсию при сглаживании или аппроксимации корреляционных функций.

Наиболее интересным представляется возможность провести сравнительный анализ поведения корреляционных функций, полученных на обоих массивах измеренных данных. Вид корреляционных функций позволяет определить характерный масштаб структур в распределении концентрации хлорофилла «А» [8].

На рис. 4 приведены корреляционные функции величин концентраций хлорофилла для флуориметрических измерений с судна (рис. 4, а) и для концентраций, полученных при обработке снимка, изображенного на рис. 2, а (рис. 4, б). Величины концентраций хлорофилла «А», находящиеся внутри

отрезка порядка 35 км вдоль маршрута судна, сильно связаны между собой, что следует из того, что значение корреляционной функции падает до 0,7 от своего максимального значения на расстоянии порядка 35 км. Значения полученных эмпирических структурной и корреляционной функций на малых расстояниях, после их экстраполяции на расстояние, равное нулю, могут быть использованы для оценки точности исходных данных и ошибок, связанных с неоднородностью и мелкомасштабными процессами. Так, из спутниковых данных, приведенных на рис. 2, а, можно получить отношение сигнал-шум для них по рис. 4, равное примерно 2. А для данных лазерной флуориметрии, приведенных на рис. 3, а, получим значение сигнал-шум порядка 10.

Используя корреляционную функцию, приведенную на рис. 4, б, можно определить радиус корреляции поля хлорофилла «А» по данным спутниковых измерений. Величина, равная 0,7 от максимального значения корреляционной функции, достигается для расстояний между центрами квадратов порядка 25–30 км, что в целом неплохо согласуется с результатом, полученным из графика на рис. 4, а.

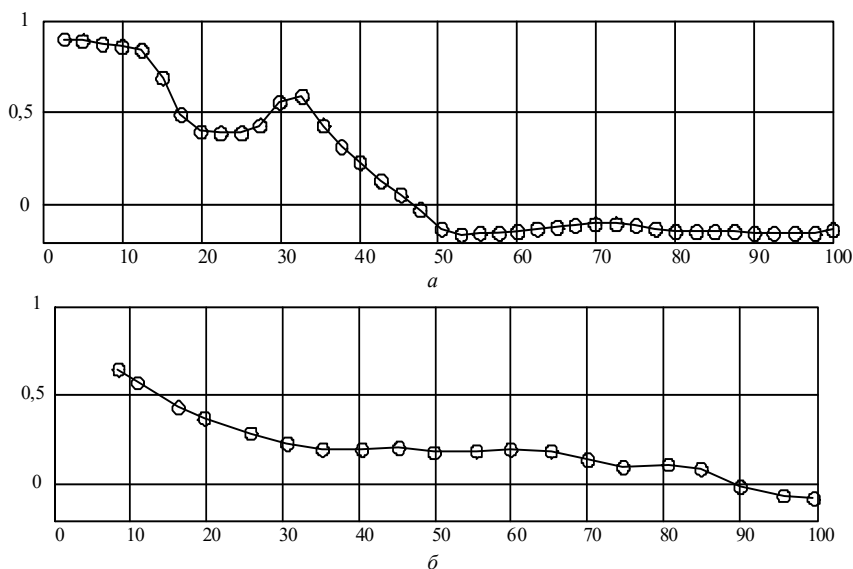


Рис. 4. Корреляционные функции флуориметрических (а) и спутниковых (б) измерений; по горизонтальным осям расстояние, км, по вертикальным – значения корреляционных функций

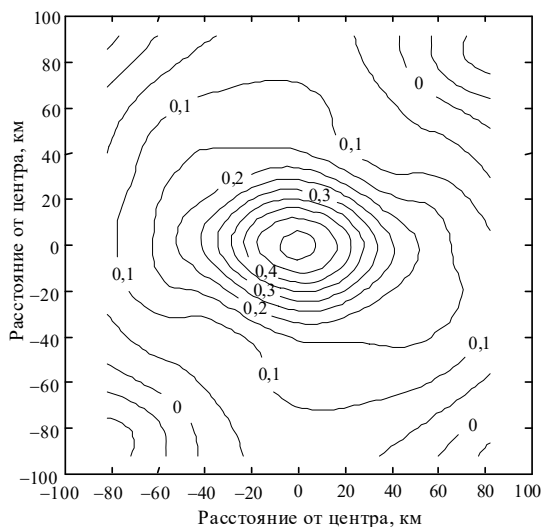


Рис. 5. Двухмерная корреляционная функция по спутниковым данным

На рис. 5 приведена двухмерная корреляционная функция, восстановленная по данным SeaWiFS. Ее анализ позволяет говорить об анизотропности поля хлорофилла на масштабах более 20 км. Так, изолинии значений функции остаются симметричными до расстояний примерно 20 км, далее происходит заметное вытягивание окружностей в эллипс. При этом ориентация больших осей эллипсов корреляций на расстояниях 50–60 км примерно совпадает с направлением движения судна (направлением ветра). Масштабы порядка 20–30 км являются типичными для верхнего слоя океана летом в средних широтах обоих полушарий и соответствуют известному внутреннему масштабу Россби, определяющему характерные размеры синоптической изменчивости гидрологических характеристик верхнего квазиоднородного слоя.

Поведение двухмерной корреляционной функции поля хлорофилла отражает известный по данным о статистической структуре различных гидрофизических полей в океане факт их изотропности на малых расстояниях и появления анизотропии (эллипсов корреляций) на масштабах, превышающих синоптические.

*O.A. Bukin, M.S. Permyakov, A.N. Pavlov, A.Yu. Maior, A.V. Maleenok, T.I. Tarkhova, G.V. Skorokhod, D.A. Akmaikin.*  
**Use of passive-active methods of optical sensing for measuring structural peculiarities of distributing biooptical characteristics in upper ocean layer.**

The investigation of the biooptical features distribution in the upper ocean layer is the one of the target of the satellite remote sensing. But, very often it is necessary to compare satellite data with simultaneously shipborne measurements to interpret of some processes more definitely.

The statistical processing of the chlorophyll concentrations simultaneously measured by SeaWiFS satellite and shipborne fluorometer in the Tasmania sea is presented in this paper. It is shown that in both cases we detected characteristic scales in the chlorophyll spatial distribution caused by the internal Rossby scales.

1. *Bukin O.A., Maior A.Yu., Pavlov A.N., Shevtsov B.M., and Kholodkevich E.D.* Measurement of the lightscattering layers and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // *Int. J. Remote Sensing*. 1998. V. 19. P. 707–715.
2. *Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W., Brown O.B., Evans R.H., and Broenkow W.W.* Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates // *Appl. Optics*. 1983. V. 22. P. 20–36.
3. *Hoge F.E., Berry R.E., and Swift R.N.* Active-passive airborne color measurement // *Appl. Optics*. 1986. V. 25. P. 39–57.
4. <http://seabass.gsfc.nasa.gov/>
5. *Букин О.А., Павлов А.Н., Майор А.Ю., Константинов О.Г., Пермяков М.С., Малеев А.В.* Некоторые результаты сравнения концентраций хлорофилла «А», полученных при дистанционном зондировании цвета моря с использованием различных двухполосных алгоритмов // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 8. С. 715.
6. *Казакевич Д.И.* Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 319 с.
7. *Гандин Л.С., Каган Р.Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.
8. *Thomson R.E.* A Cyclonic Eddy over the Continental Margin of Vancouver Island: Evidence for Baroclinic Instability // *J. of Phys. Ocean*. 1984. V. 14. P. 1326–1348.