

# АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.Д. Пухтяр

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

*В работе на основе данных дистанционного зондирования полей концентрации хлорофилла и температуры поверхности моря проводится анализ их статистической структуры. Получены оптимальные масштабы сглаживания исследуемых рядов, корреляционные и спектральные функции, радиусы корреляции и их распределения на акватории северо-западной части Черного моря. Определены наибольшие допустимые разнесения измеряемых параметров при заданной средней точности их оптимальной интерполяции.*

**Введение.** При обработке данных натурных измерений и их анализе важным этапом необходимым для достоверного исследования явления является анализ статистической структуры данных. В измерениях гидрологических полей в системе пространственно (временных) разнесенных точек, как правило, присутствуют детерминированные и случайные составляющие, разделить которые не всегда легко удается, поэтому такое разделение является важной задачей при обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и морской поверхности.

**Используемые данные и методика исследования.** В предлагаемой работе использовались синхронные данные спутниковых измерений поверхностных значений концентрации хлорофилла и температуры Черного моря, получаемые отделом дистанционных методов исследований МГИ НАНУ из архива NASA, измеренные с помощью сканирующего оптического спектрометра SeaWiFS, предназначенного для получения информации о крупномасштабных цветовых полях морских акваторий [1,2]. Данные измерений помещались на равномерную сетку с шагом 1 км. Исследовались ряды данных по параллели и

меридиану в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ), имеющие до 370 измерений на разрезе. Проводилась проверка данных на доброкачественность путем отбраковки выбросов и выбора реализаций без пропусков на сетке.

Основой анализа статистической структуры исследуемого поля является выбор оптимальных масштабов осреднения (сглаживания) данных, необходимых для достоверного исследования явления, представления о качестве получаемых значений математического ожидания, дисперсии и корреляционных функций, а также для проведения съемки, с оптимальной дискретностью позволяющей получать максимально возможный объем информации при существующем ресурсе памяти и измерительных возможностях регистрирующей аппаратуры.

По свидетельствам многих исследователей гидрологические поля в океане не являются стационарными (временные) и однородными (пространственные) и, следовательно, эргодическими. В нашем случае неоднородности пространственных распределений полей концентрации хлорофилла и температуры, вызываемые изменчивостью ряда факторов, выражены зависимостью закономерных составляющих поля от пространственной координаты. Отделим эти детерминированные, закономерные составляющие в реализации измерений от случайных. Тогда выделенные величины будут уже близки к однородному случайному процессу. Однако, для такого разделения необходимо знание оптимальных масштабов осреднения (сглаживания) рядов наблюдений температуры и концентрации хлорофилла ( $L_{от}, L_{ос}$ ). Для нахождения оптимального масштаба ( $L_0$ ) воспользуемся следующими условиями: значения математического ожидания ( $M$ ), дисперсии ( $D_f$ ), параметра Корню (отношение среднего квадрата отклонений измеряемой величины  $f$  ( $D_f$ ) к квадрату среднего значения ее модуля,  $Kr = D_f / \overline{|f|}^2$ , где  $\overline{|f|}^2$  – квадрат среднего значения модуля отклонений измеряемой величины) и корреляционные функции при изменении масштаба осреднения не должны резко изменяться [3]. Проводить, таким образом фильтрацию данных желательнее до больших значений масштабов  $L_0$  для включения более длинно масштабных гармоник.

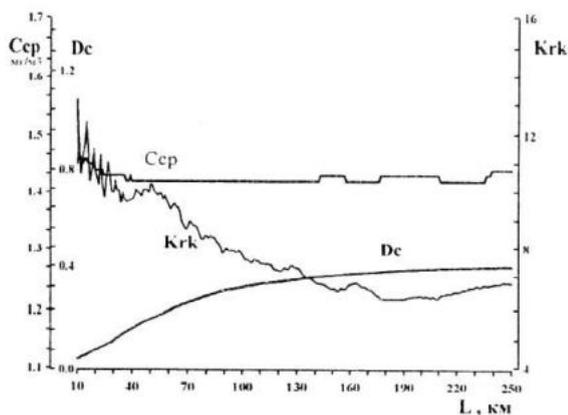


Рисунок 1 – Зависимости математического ожидания, дисперсии и параметра Корню от масштаба осреднения  $L_0$  на разрезе концентрации хлорофилла вдоль параллели  $44^{\circ}30'$  с.ш. в СЗЧМ

Тогда полученный ряд наблюдений дискретных по пространству гидрологических характеристик можно рассматривать как совокупность значений случайных величин. При этом, если значение параметра Корню близко к  $\pi/2$ , тогда случайный процесс подчиняется нормальному закону распределения. Фильтрация данных спутниковых измерений поверхностных значений концентрации хлорофилла и температуры Черного моря проводилась методом скользящего среднего. Анализировались изменения значений указанных параметров (математического ожидания, дисперсии, параметра Корню) в зависимости от масштаба осреднения  $L_0$  на выбранных разрезах концентрации хлорофилла и температуры вдоль параллелей от  $44^{\circ}00'$  до

Таблица – Статистические характеристики при оптимальном осреднения температуры и концентрации хлорофилла на разрезах в СЗЧМ, 6.07.2006г.

разрез вдоль	$L_{от}$ км	$L_{ос}$ км	$r_{kt}$ км	$r_{kc}$ км	$Kr_t$	$Kr_c$	$D_t$	$D_c$	$t, ^{\circ}C$	$C$ , мг/м <sup>3</sup>	$N_t$	$N_c$
$44^{\circ}$ с.ш.	160-210	180-216	12	11,5	1,68	6,36	0,25	0,39	22,4	1,42	372	361
$44,5^{\circ}$ с.ш.	160-206	190-250	13	26	1,6	3,57	0,7	0,91	22,6	1,97	323	290
$45^{\circ}$ с.ш.	134-179	134-210	18	18	1,57	3,44	0,86	1,43	22,55	1,81	277	254
$45,5^{\circ}$ с.ш.	120-150	110-180	13,5	9,8	1,9	5,21	0,5	0,24	22,8	2,6	216	187
$46^{\circ}$ с.ш.	125-150	75-110	10,3	24	2,03	1,73	0,18	4,8	22,54	4,24	181	153
$46,5^{\circ}$ с.ш.	70	60	10	10	2,9	1,2	2,8	1,8	22,5	11,3	71	60
$30^{\circ}$ в.д.	60-110	60-90	4,5	5,3	1,58	1,62	0,12	3,6	23,1	5,8	174	160
$30,5^{\circ}$ в.д.	60-110	90-110	6,5	12	1,6	2,7	0,08	2,7	22,7	3,3	197	194
$31^{\circ}$ в.д.	80-120	80-130	9	9,8	1,5	4,2	0,08	2,3	22,8	2,3	208	208
$31,4^{\circ}$ в.д.	80-135	100-155	12	8,3	1,47	3,3	0,08	1,7	22,3	2,3	238	237
$32^{\circ}$ в.д.	90-120	85-140	24	4,6	1,5	4,6	0,17	0,044	21,8	1,3	212	211
$32,4^{\circ}$ в.д.	90-135	60-125	22	4,6	1,54	10,2	0,28	0,76	21,7	1,4	238	237

$46^{\circ}30'$  с.ш. и меридианов от  $28^{\circ}40'$  до  $33^{\circ}50'$  в.д. в СЗЧМ.

Пример указанных зависимостей приводится на рис.1 для разреза  $44^{\circ}30'$  с.ш. Из проведенного анализа следует, что масштабы осреднения на одном и том же разрезе являются различными для значений концентрации хлорофилла  $L_{ос}$  и температуры  $L_{от}$ . Это можно видеть из таблицы, где приводятся оптимальные масштабы осреднения  $L_{от}$  и  $L_{ос}$  на разрезах вдоль параллели и меридианов в СЗЧМ.

(В таблице приняты следующие обозначения характеристик температуры и концентрации хлорофилла соответственно  $L_{от}$ ,  $L_{ос}$  - масштабы осреднения в км;  $r_{kt}$ ,  $r_{kc}$  - радиусы корреляции в км при  $K=0,3$ ;  $Kr_t$ ,

$Kr_c$  - параметры Корню;  $D_t$ ,  $D_c$  - дисперсии ( $^{\circ}C^2$  и  $(мг/м^3)^2$ ;  $t$  - температура,  $C$  - концентрация хлорофилла,  $N_t$ ,  $N_c$  - число точек разреза).

С ростом широты и уменьшением долготы  $L_{от}$  и  $L_{ос}$  уменьшаются, а различия между ними меняются неравномерно. Обусловлено это тем, что с ростом широты и уменьшением долготы в СЗЧМ не одинаково растут неоднородности распределений хлорофилла и температуры. В глубоководном районе моря, где наиболее однородные распределения хлорофилла и температуры их оптимальные масштабы осреднения  $L_{от}$  и  $L_{ос}$  почти совпадают, составляя около 200 км. С продвижением на север и на запад, с ростом неоднородности

распределений параметров их оптимальные масштабы осреднения уменьшаются не одинаково и на разрезе  $46^{\circ}00'$  с.ш. составляют для температуры  $L_{от}=125-150$  км, а для хлорофилла  $L_{ос}=75-110$  км (таблица).

Исследуя для распределений хлорофилла и температуры параметр Корню можно заключить, что распределение температуры довольно хорошо подчиняется нормальному закону распределения, а концентрация хлорофилла этому закону следует не всегда, а только на некоторых разрезах, в отдельных частях моря (таблица).

Пример корреляционных функций температуры (а) и концентрации хлорофилла (б) на разрезе  $45^{\circ} 30'$  с.ш. 06.07.2006г. в СЗЧМ при различных масштабах сглаживания

приводится на рис.2. Можно видеть, что наименее изменчивы корреляционные функции при приближении значений масштабов осреднения к значениям оптимальных, для температуры при  $L_{от}= 120-150$  км, а хлорофилла – при  $L_{ос}= 120-180$  км. Радиусы корреляции рассматриваемых параметров при  $K= 0,3$  в СЗЧМ составили от 4,5 до 26 км (таблица). Кроме этих масштабов, важным параметром является наибольший масштаб разнесения измерительных данных, при котором возможна их интерполяция с заданной точностью. Эту задачу впервые рассматривали Д. Питерсен и Д. Мидлтон в работе по измерению и расчету случайных полей с помощью спектрального алгоритма оптимальной интерполяции

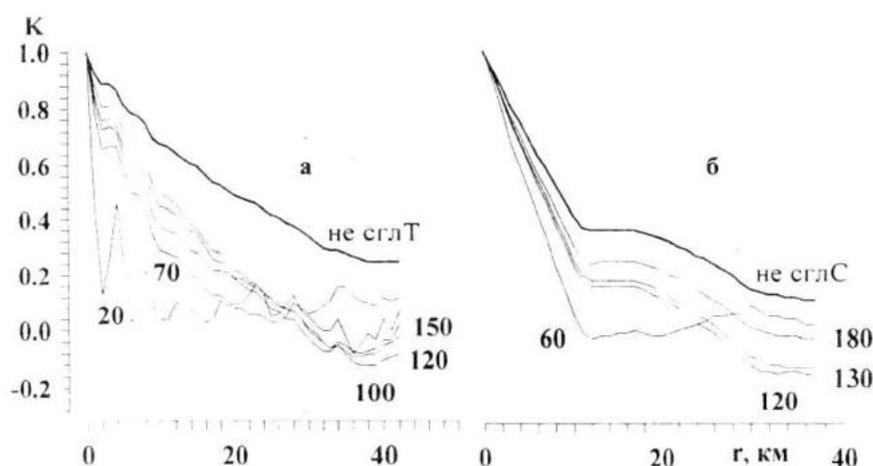


Рисунок 2 – Зависимости корреляционных функций температуры (а) и концентрации хлорофилла (б) на разрезе  $45^{\circ} 30'$  с.ш. 06.07.2006г. в СЗЧМ от измененний масштаба сглаживания, цифры у кривых соответствуют масштабу сглаживания  $L_0$ .

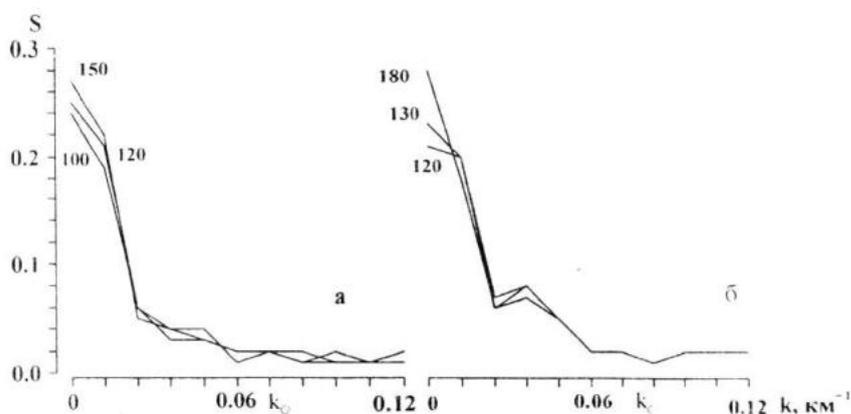


Рисунок 3 – Спектральные функции температуры (а) и концентрации хлорофилла (б) на разрезе  $45^{\circ} 30'$  с.ш. 06.07.2006 г. в СЗЧМ при масштабах оптимального сглаживания 100-180 км.

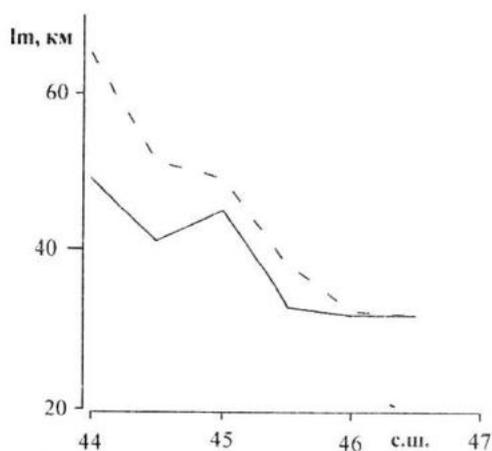


Рисунок 4 – Зависимости оптимального шага измерений концентрации хлорофилла (сплошная линия) и температуры (штриховая линия) от широты в СЗЧМ

[4]. Их подход позволяет заранее спланировать съемку поля, поскольку в нем шаг сетки измерений  $I_m$  оказывается связанным простым соотношением с формой и размерами основания спектра пространственного поля  $S(\mathbf{k})$ . Шаг сетки измерений  $I_m$  выбирался основываясь на теории В.А. Котельникова [5] следующим образом:

строилась спектральная функция моделируемого процесса и устанавливалась верхняя граничная величина  $k_0$  при условии, чтобы средняя ошибка расчета поля

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{k_0} S(k) dk \text{ не превышала заданной}$$

величины. Тогда  $I_m = \frac{\pi}{k_0}$ . Рассмотрим оп-

тимальный шаг  $I_m$  данных расположенных на сетке измерений для получения 2% средней точности вычислений методом оптимальной интерполяции с менее редкой сеткой, чем этот масштаб на акватории СЗЧМ.

Для вычисления  $I_m$  исследовались спектральные функции на разрезах в СЗЧМ. Пример спектральных функций концентрации хлорофилла (а) и температуры (б) морской поверхности на разрезе по широте  $45^{\circ}30'$  с.ш. при различных масштабах сглаживания приводятся на рис. 3. Выявлено, что значение оптимального шага сетки измерений  $I_m$  зависит от широты, рис.4. Для заданной средней точности наблюдается неравномерное изменение оптимального шага  $I_m$  данных расположенных на сетке измерений как для концен-

трации хлорофилла ( $I_{mc}$ ), так и для температуры ( $I_{mt}$ ) в зависимости от широты. Наибольшие различия между  $I_{mc}$  и  $I_{mt}$  наблюдаются на юге СЗЧМ (51 км и 65 км соответственно), однако при движении на север масштабы  $I_{mc}$  и  $I_{mt}$  сближаются, достигая 32 км на широте  $46^{\circ}30'$  с. ш., рис.4. Отметим, что эти масштабы проявляют зависимость от неоднородности  $C$  и  $t$ .

**Основные результаты.** Получены оптимальные масштабы сглаживания исследуемых рядов концентрации хлорофилла и температуры поверхности моря и их зависимости от пространственных координат (широты и долготы) в СЗЧМ.

Построены корреляционные и спектральные функции сглаженных рядов и на их основе найдены распределения на акватории СЗЧМ радиусов корреляции и значений оптимального шага  $I_m$  данных расположенных на сетке измерений при заданной точности их оптимальной интерполяции. Найдено, что распределение температуры поверхности моря подчиняется нормальному закону.

Показано, что при заданной средней точности оптимальной интерполяции 2% расчеты можно выполнять при разнесении исходных данных на максимально допустимые удаления, составляющие 32 – 51 км для концентрации хлорофилла и – 32 – 65 км для температуры морской поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Суетин, В.В. Суслин, А.А. Кучерявый, С.Н. Королев, Г.П. Берсенева. Особенности интерпретации данных дистанционных оптических наблюдений Черного моря с помощью прибора SeaWiFS. Мор. гидрофиз. журн., 2001, N2. – С. 71 – 79.
2. С.Р. McClain, М.Л. Cleave, G.C. Feldman et al. Science quality SeaWiFS data for global biosphere research // Sea Technol. – 1998. – 39, N9. – P. 10 – 16.
3. Р.В. Озмидов. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. – М.: «Наука», 1968. – 199 с.
4. D. Petersen, D. Middleton. On representation observations. – Tellus, 1963, 15. – P. 387–405.
5. В.А. Котельников. О пропускной способности эфира. М.: Изд-во Упр. Связи РККА, 1933. – 62 с.