

# СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОВАРИАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ХЛОРОФИЛЛА «А» И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

*Е.Ф. Васечкина*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: cpdi@rambler.ru

*Анализируются результаты расчетов четырехмерных пространственных корреляционных функций полей температуры поверхности и содержания хлорофилла «а» в Черном море по массиву данных дистанционного зондирования, полученных в летние сезоны 2007 – 2009 гг.*

В относительно немногочисленных работах, посвященных анализу статистических свойств полей температуры поверхности Черного моря (ТПМ), отмечается их существенная неоднородность и анизотропность. В работах [1-3] рассчитывались одномерные и двумерные корреляционные функции полей температуры и солености по нескольким съемкам или для отдельных сезонов года. Недостаточность информации, обеспечиваемой контактными измерениями, препятствовала прямому расчету четырехмерной пространственной ковариационной функции  $P(x_i, y_i, x_j, y_j)$ . Пространственная изменчивость статистических свойств полей оценивалась с помощью выполнения расчетов вдоль разрезов, в основном в меридиональном и широтном направлениях. С накоплением данных дистанционного зондирования становится возможным получение более точных оценок пространственной ковариационной функции. В работе [4] оценки ковариаций строились с использованием дистанционных данных, однако получены также только одномерные функции вдоль широтных и меридиональных разрезов. Все авторы приводят оценочные величины радиусов корреляции, однако эти оценки не согласуются друг с другом и имеют большой разброс для одних и тех же районов моря. В то же время знания о статистической структуре полей температуры и других параметров водной среды приобретают все большее прикладное значение в связи с развитием оперативной океанографии. Оптимальная

интерполяция, восстановление пропусков, усвоение данных наблюдений в моделях базируются на использовании информации о свойствах корреляционной функции соответствующего поля.

Особую актуальность приобретает построение четырехмерной ковариационной функции в связи с возможностью восстановления пропусков в данных дистанционного зондирования, обусловленных облачностью. При наличии достаточно репрезентативной оценки этой функции становится возможным восстанавливать с приемлемой ошибкой снимки, имеющие до 70% пропусков. В данной работе излагаются результаты расчетов четырехмерных пространственных корреляционных функций полей ТПМ и содержания хлорофилла «а» в Черном море по массиву данных дистанционного зондирования, полученных в летние сезоны 2007 – 2009 гг. и проводится их сравнительный анализ. Расчеты выполнены с целью дальнейшего использования их в задаче реконструкции спутниковых снимков.

Имеющиеся в настоящее время данные MODIS о температуре и цветности моря имеют разрешение 1 км. Если рассматривать конкретно задачу реконструкции полей спутниковых данных по Черному морю, то надо иметь в виду, что каждый снимок за вычетом границ имеет более 300 000 точек, потенциально несущих полезную информацию. Понятно, что расчет ковариационной функции всего моря при сохранении разрешения 1 км невозможен. Можно разделить площадь снимка на квадраты, и рассчитывать ковариационную матрицу по этим квадратам, сохраняя мелкую сетку, однако при этом возникает две проблемы. Первая – как «сшивать» результирующее поле, состоящее из нескольких квадратов. Вторая и главная – для восстановления поля в квадрате нужно, чтобы в нем присутствовало достаточное количество точек, обеспеченных данными. Если квадрат небольшой, например, 50 × 50 км (ковариационная матрица будет при этом иметь размер 2500 × 2500), то его площадь меньше характерных размеров белых пятен на снимках. Следовательно, многие квадраты не будут содержать ни одного значимого отсчета и не могут быть восстановлены.

Другой способ решения – осреднять исходные поля, тем самым понижая размер

ковариационной матрицы. Этот путь более приемлем, особенно если учесть, что для конечного пользователя, как правило, не представляет интереса мелкомасштабная изменчивость полей ТПМ или хлорофилла, имеющая зачастую характер белого шума. В настоящем исследовании мы применяли осреднение исходных спутниковых полей с разрешением 1 км на сетке  $7 \times 7$  км. Кроме того, мы разделили море на два участка (западный и восточный) с тем, чтобы еще больше сократить размер получающейся ковариационной матрицы. Граница разделения приходится на центральную часть моря, где отсутствуют большие градиенты гидрологических параметров. Проблема соединения двух участков полей – западного и восточного – здесь нами специально не рассматривается, однако наш опыт показывает, что при корректном расчете ковариационных матриц и соответствующих собственных функций она не представляет особых затруднений.

Итак, западная часть моря после осреднения может быть представлена массивом данных  $82 \times 65$ , в котором 3566 точки приходится на область моря. Таким образом, искомая ковариационная матрица будет иметь размер  $3566 \times 3566$ .

Рассмотрим теперь практические аспекты расчетов. Вначале определялся набор переменных, для которого и вычислялась в дальнейшем ковариационная матрица. Каждая переменная представляла собой последовательность значений наблюдаемого поля в некоторой точке с координатами  $(x, y)$ . Размерность набора в данном случае равнялась 3566. Для построения оценки ковариационной матрицы формировался ансамбль независимых реализаций поля, полученных обработкой спутниковых снимков в различные моменты времени с дискретностью не меньше одних суток. В расчетах, приведенных ниже, ансамблем считался набор реализаций, полученных в летний период, с июня по сентябрь 2007-2009 гг. Двумерное поле преобразовывалось в одномерную реализацию путем конкатенации строк массива данных, при этом исключались точки, лежащие за пределами моря. Полученные таким образом строки организовывались в массив, который представлял собой множество квазинезависимых значений переменных системы в различные моменты времени

$$X(i, j), i = 1, \dots, T; j = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где  $T$  – мощность статистического ансамбля,  $M$  – размерность вектора состояния системы. Данный массив использовался для расчета среднего поля и затем ковариационной матрицы отклонений искомой функции от среднего.

При рассмотрении спутниковых снимков, имеющих пропуски вследствие наличия непрозрачных облаков над морем, выясняется, что на некоторых из них присутствуют искажения в данных на краях «белых пятен», вызываемые недостаточно корректным удалением отсчетов в области, скрытой облаками. Например, можно видеть такие снимки как на рисунке 1, где черные точки по краям белых пятен (пропусков) после преобразования в градусы Цельсия будут давать искаженные значения температуры.

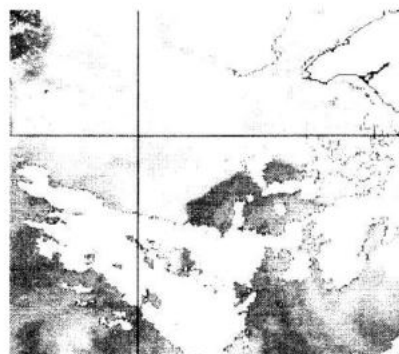


Рисунок 1 – Пример спутникового изображения, содержащего пропуски и искажения в данных на границе областей, закрытых облаками.

Эти искаженные данные оказывают существенное влияние на результирующую ковариационную функцию, поэтому их необходимо тщательно удалять с тех снимков, где они имеются. Для этого выполнялась следующая процедура. Строилась гистограмма распределения искомой характеристики для каждого поля из ансамбля с числом интервалов, равным 20. На снимках, содержащих ошибочные значения (как слишком высокие, так и слишком низкие), гистограмма имела длинные хвосты как вправо, так и влево, с малыми значениями частоты встречаемости. Значения поля, имеющие низкую вероятность, фильтровались. Если амплитуда значений превышала заданную пороговую величину, из массива удалялись значения, имеющие частоту,

меньшую одной сотой от максимальной частоты распределения.

Было установлено, что для полей содержания хлорофилла такую префильтрацию необходимо производить до пересчета данных в собственно концентрацию хлорофилла «а» в  $\text{мг}/\text{м}^3$ , поскольку после такого пересчета гистограмма приобретает вид экспоненциального распределения, и удалить ошибочно низкие и ошибочно высокие значения уже не представляется возможным.

Каждая реализация из ансамбля (1) имела то или иное количество пропусков. Среднее и корреляционная функция рассчитывались с использованием всей доступной информации. При этом суммирование производилось во всех точках, где есть данные. Например,  $i$ -тая реализация функции  $f(\mathbf{x}_k, t)$  определена в точках  $\mathbf{x}_k, k = 1, \dots, N$  и содержит пропуски, которые распределены таким образом, что значения функции  $f$  известны только в наборе точек  $N_i, N_i < N$ . Пусть в нашем распоряжении имеется набор из  $T_i$  реализаций, каждая из которых также имеет пропуски. Среднее значение функции можно вычислить, суммируя значения в точках, обеспеченных данными в каждой реализации

$$S(\mathbf{x}_i) = \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} f(\mathbf{x}_i, t), \quad (2)$$

где  $T_i$  — число реализаций, имеющих значение функции в точке  $\mathbf{x}_i$ .

Оценка ковариационной матрицы будет тогда вычисляться по формуле

$$P(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) = \frac{1}{T_{jk}} \sum_{t=1}^{T_{jk}} f(\mathbf{x}_i, t) f(\mathbf{y}_i, t), \quad (3)$$

$$f'(\mathbf{x}_i, t_i) = f(\mathbf{x}_i, t_i) - S(\mathbf{x}_i)$$

где суммирование выполняется только для тех реализаций, числом  $T_{jk}$ , в которых точки  $\mathbf{x}_i$  и  $\mathbf{y}_i$  содержат значения функции. Полученная ковариационная матрица в разных точках будет иметь разную репрезентативность, поскольку обеспеченность данными будет разная.

Средние поля температуры и содержания хлорофилла «а» на поверхности, построенные по ансамблю реализаций за июнь-сентябрь 2007-2009 гг. представлены на рисунке 2. После удаления этих средних рассчитывались неоднородные ковариационные функции для всех точек рассматри-

ваемой области. Размер ковариационной матрицы был  $3566 \times 3566$ , каждая строка (или столбец) матрицы представляла собой пространственное распределение ковариации для одной точки области. После адекватного преобразования этой строки в двумерный массив с внесением границ области, можно было анализировать распределение ковариационной функции в разных точках западной части Черного моря.

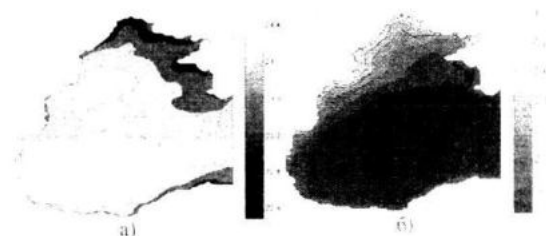


Рисунок 2 Средние поля а) ТПМ западной части Черного моря и б) логарифма содержания хлорофилла «а», летний сезон 2007-2009 гг.

Оценки ковариационной функции, построенные для разных районов моря, существенно различались. Если в центре моря радиус корреляции был достаточно велик, что хорошо видно на рисунке 3, и поле выглядело довольно гладким, то ковариационная функция для точек, расположенных на северо-западном шельфе и в окрестностях Крымского полуострова, была изрезана, а радиус корреляции был существенно меньше. При этом репрезентативность оценок корреляционных функций для разных областей была приблизительно одинаковой — как правило, осреднение производилось по 60-70 значениям (максимум 120, минимум 20 в крайних точках у берегов).

Осредненные профили функции вдоль меридиональных разрезов для центральной области и северо-западного шельфа показаны на рисунке 4а. При  $r = 0.6$  радиусы корреляции можно оценить в 140 и 60 км соответственно.

Корреляционная функция полей хлорофилла «а» существенным образом отличалась от корреляционной функции ТПМ, что хорошо видно при сопоставлении рисунков 3 и 5. Обращает на себя внимание существенная анизотропия поля в центральной его части, обусловленная большим градиентом концентрации в направлении, перпендикулярном берегу. На шельфе также наблюдается анизотропия полей: изолинии кор-

функции вытянуты вдоль берегов вплоть до дельты Дуная. Корреляционные связи между различными районами (за исключением центральной части моря) заметно ниже, что подтверждает рисунок 4б, на котором показаны профили корреляционной функции вдоль меридиана 31° в.д.

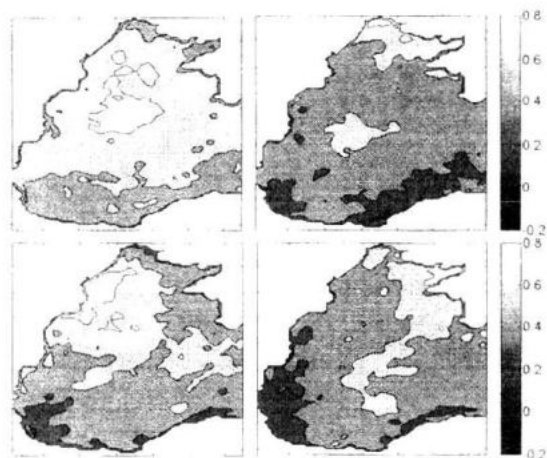


Рисунок 3 – Примеры оценок корреляционной функции ТПМ, рассчитанной для разных областей западной части Черного моря: центральной части, северо-западного шельфа, дельты Дуная, Каркинитского залива.

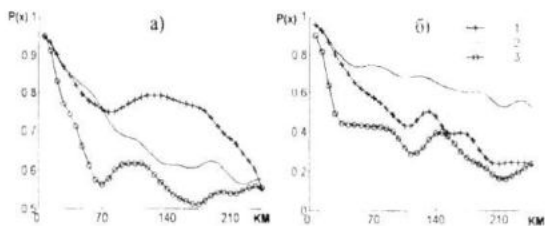


Рисунок 4 – Одномерные корреляционные функции а) ТПМ и б) содержания хлорофилла «а» вдоль меридионального разреза 31° в.д. для: 1 – центральной части моря в направлении на север, 2 – той же области, но в обратном направлении, 3 – северо-западного шельфа.

Полученные оценки позволяют утверждать, что радиус корреляции поля хлорофилла «а» в летний сезон при  $r = 0.5$  может меняться в пределах от 15 до 200 км в зависимости от области моря и направления.

**Заключение.** Выполненное исследование подтвердило ранее высказывавшееся положение о существенной неоднородности и анизотропии как гидрологических, так и (в значительно большей степени) биологических полей поверхности Черного моря.

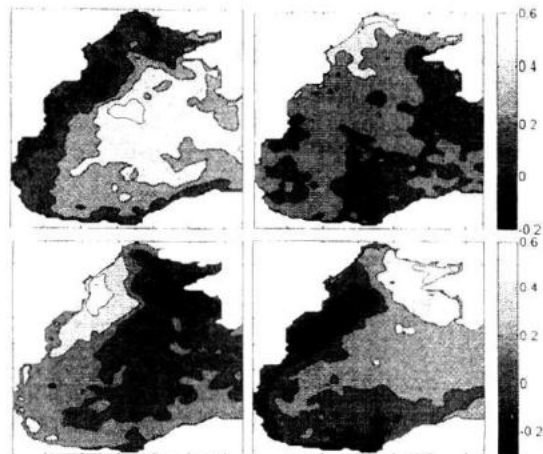


Рисунок 5 – Корреляционные функции распределения содержания хлорофилла «а» для тех же областей, что и на рисунке 3.

Проведение аналогичных расчетов для других сезонов года пока затруднено из-за недостатка данных, но можно предположить, что результаты будут аналогичные приведенным. Необходимо отметить, что рассчитанные функции обладают достаточной устойчивостью и при добавлении новых реализаций меняются весьма незначительно. Таким образом, их можно использовать в целях оптимальной интерполяции и восстановления пропусков в данных.

## Литература

1. Белокопытов В.Н., Полонский А.Б. О пространственной статистической структуре термохалинных полей Черного моря // Морские технологии и приборостроение. – Севастополь: МГИ НАНУ, 1993. – С. 25–26.
2. Григорьев А.В., Иванов В.А., Капустина Н.А. Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // Океанология. – 1996. – 36, № 3. – С. 364–369.
3. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 51–65.
4. Пухтяр Л.Д., Станичный С.В., Тимченко И.Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 34–50.