

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ  
ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
КРУПНОМАСШТАБНЫХ  
ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ  
В ЧЕРНОМ МОРЕ

*И.Г.Шокурова.*

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

*Рассчитываются пространственные корреляционные функции для крупномасштабных полей температуры и солёности в верхнем 300 метровом слое Чёрного моря для различных сезонов с целью восстановления климатических полей по архивным данным методом оптимальной интерполяции. Анализируется пространственно-временная изменчивость статистической структуры полей.*

**Введение.** Одним из наиболее эффективных методов восстановления полей на регулярной сетки по данным измерений на нерегулярной сетке является метод оптимальной интерполяции [1]. Учитывая особенности взаимного расположения станций, он обеспечивает максимальную точность восстановления полей. Обоснование для использования этого метода для восстановления океанологических полей, в частности для восстановления полей в Чёрном море было выполнено в работах [2,3].

Применение оптимальной интерполяции требует предварительного анализа статистической структуры полей - вычисления корреляционных функций. Сложность исследования статистической структуры океанологических полей при малом количестве данных и их несинхронном характере является основной причиной того, что метод оптимальной интерполяции ранее не использовался при построении климатических полей в Чёрном море. К настоящему времени для Чёрного моря сформирован новый более полный массив данных гидрологических измерений, который позволяет провести анализ пространственно-временной изменчивости статистической структуры крупномасштабных полей температуры и солёности для всех сезонов и использовать метод оптимальной интерполяции для их восстановления.

Статистическая структура полей температуры солёности Чёрного моря исследовалась в работах [2,4,5,6]. Вычислялись одномерные корреляционные функции в предположении изотропии поля и корреляционные функции в зональном и меридиональном направлении и в направлении 45°. Двумерные корреляционные функции не вычислялись. В работах [2,5,6] была отмечена анизотропия термохалинных полей в Чёрном море.

В настоящей работе вычисляются пространственные одномерные и двумерные автокорреляционные функции полей отклонений температуры и солёности от средних по полю значений по современному массиву многолетних архивных данных, позволяющие систематически обобщить сведения о статистической структуре полей с целью восстановления климатических полей методом оптимальной интерполяции.

Данные, использованные в работе, и методика расчетов. Для вычисления корреляционных функций используются данные измерений температуры и солёности в Чёрном море из банка гидрологических данных МГИ НАН Украины. Корреляционные функции вычисляются на горизонтах 0, 50, 100 и 300 метров по архивным данным за весь период наблюдений в Чёрном море для февраля (6800 станций), августа (19800 станций), октября (14600 станций). Для того чтобы вклад всех районов был одинаковым, координаты данных округляются до первого знака после запятой, затем данные, имеющие одинаковые координаты осредняются. В результате этого данные приводятся к узлам сетки с шагом 6'x6' (~11x8 км).

В предположении изотропии поля, пространственные одномерные нормированные автокорреляционные функции рассчитываются по формуле:

$$\mu(r_k) = \frac{1}{(n_r - 1)\sigma^2} \sum_{i \neq j}^{n_{r_k}} f_i' f_j', \quad (1)$$
$$i, j = 1, \dots, n_{r_k}, \quad k = 1, \dots, K,$$

где  $f_i'$  и  $f_j'$  отклонение от нормы параметра в точках с координатами  $x_i, y_i$  и  $x_j, y_j$  соответственно ( $x$  - широта,  $y$  - долгота). В качестве нормы используется среднее по полю значение элемента [2].

Суммирование производится в пределах заданных градаций расстояний между станциями  $r_k = k \cdot \Delta r$ , где  $\Delta r$  - шаг градации,  $K$  - число градаций,  $n_k$  - число пар станций, расстояние между которыми попадает в градацию  $r_k$ . Расстояние между станциями  $\rho$  попадает в данную градацию, если оно попадает в интервал  $\rho \in [r_k \pm \Delta r / 2]$ . При  $r = 0$  корреляционная функция  $\overline{f'^2}$  равна дисперсии

$$\overline{f'^2} = \frac{1}{(n_0 - 1)} \sum_{i=j}^{n_0} f'_i f'_j = \sigma^2, i, j = 1, \dots, n_0 \quad (2)$$

Для анализа анизотропии поля вычисляется пространственная двумерная нормированная автокорреляционная функция, учитывающая изменение статистических свойств поля в зависимости от направления:

$$\mu(r_k, r_l) = \frac{1}{(n_r - 1)\sigma^2} \sum_{i \neq j}^{n_{r_k, r_l}} f'_i f'_j, \quad (3)$$

$$i, j = 1, \dots, n_{r_k, r_l},$$

$$k = -K, \dots, 1, 0, 1, \dots, K, \quad l = -L, \dots, 1, 0, 1, \dots, L.$$

Суммирование производится в пределах градаций расстояний  $r_k = k \cdot \Delta r$ ,  $r_l = l \cdot \Delta r$ , где  $\Delta r$  - шаг градации,  $K$  - число градаций в зональном направлении,  $L$  - число градаций в меридиональном направлении;  $n_{r_k, r_l}$  - число пар станций, для которых расстояние  $\rho_x$  между координатами широты  $x_i$ ,  $x_j$  и расстояние  $\rho_y$  между координатами долготы  $y_i$ ,  $y_j$  одновременно попадают в градации  $\rho_x \in [r_k \pm \Delta r / 2]$  и  $\rho_y \in [r_l \pm \Delta r / 2]$ .

Корреляционные функции вычисляются по формулам (1) - (3) с градациями 20 и 40 км. В качестве радиуса корреляции принимается расстояние, при котором корреляционная функция принимает нулевое значение.

**Результаты вычислений корреляционных функций по архивным данным и их анализ.** Расчеты двумерных корреляционных функций по данным февраля, июля, августа и октября показали, что статистическая структура крупномасштабных полей

отклонений температуры и солености является анизотропной. Анизотропия проявляется в разной степени в зависимости от сезона и горизонта.

На поверхности поля отклонений температуры и солености пространственно неоднородны. В области северо-западного шельфа, двумерные корреляционные функции поля солености вытянуты в направлении вдоль склона шельфа. Корреляционные функции поля отклонений температуры имеют аналогичный вид, кроме летнего сезона. В глубоководной части моря, вид двумерных корреляционных функций поверхностного поля температуры меняется в зависимости от сезона (рис. 1а). Корреляционные функции поверхностного поля солености близки к изотропным во все рассматриваемые сезоны, при этом радиус корреляции существенно зависит от сезона (рис. 1б). Осредненный по всем направлениям радиус корреляции в глубоководной части моря в зимний и летний периоды для солености составляет 200-250 км, для температуры до 350 км. В осенний период величина радиуса корреляции уменьшается для солености до 120 км, для температуры до 280 км.

На горизонте 50 метров корреляционная функция поля температуры в феврале, в период интенсивной конвекции и формирования холодного промежуточного слоя (ХПС), характеризуется радиусом корреляции до 350 км, что близко к корреляционной функции для поверхности (рис. 1а). В летний и осенний сезоны радиус корреляции уменьшается и имеет величину менее 200 км. Двумерные корреляционные функции поля солености вытянуты в зональном направлении (рис. 1б); средний радиус корреляции для всех сезонов составляет около 150 км.

Радиус корреляции в меридиональном направлении уменьшается с глубиной. Для корреляционных функций, вычисленных для поля солености, радиус корреляции в этом направлении достигает минимальных значений в области пикноклина - на горизонтах 50 метров и глубже. Для корреляционных функций, вычисленных по данным температуры, уменьшение радиуса корреляции происходит под ХПС.

На горизонте 100 м, в слое пикноклина, двумерные корреляционные функции, как для поля солености, так и для поля темпе-

ратуры, вычисленные по всей акватории моря для всех сезонов, имеют форму эллипсов, с большой полуосью вытянутой в зональном направлении, и с небольшим наклоном в северо-восточном направлении. Радиус корреляции в меридиональном направлении в среднем для всех сезонов составляет порядка 100 км, в зональном на-

правлении до 300 км (рис. 1). В летний сезон радиус корреляции уменьшается в зональном направлении и увеличивается в меридиональном направлении. Усиление анизотропии в зимний период и ослабление в летний отражает сезонную изменчивость крупномасштабной циркуляции в Черном море.

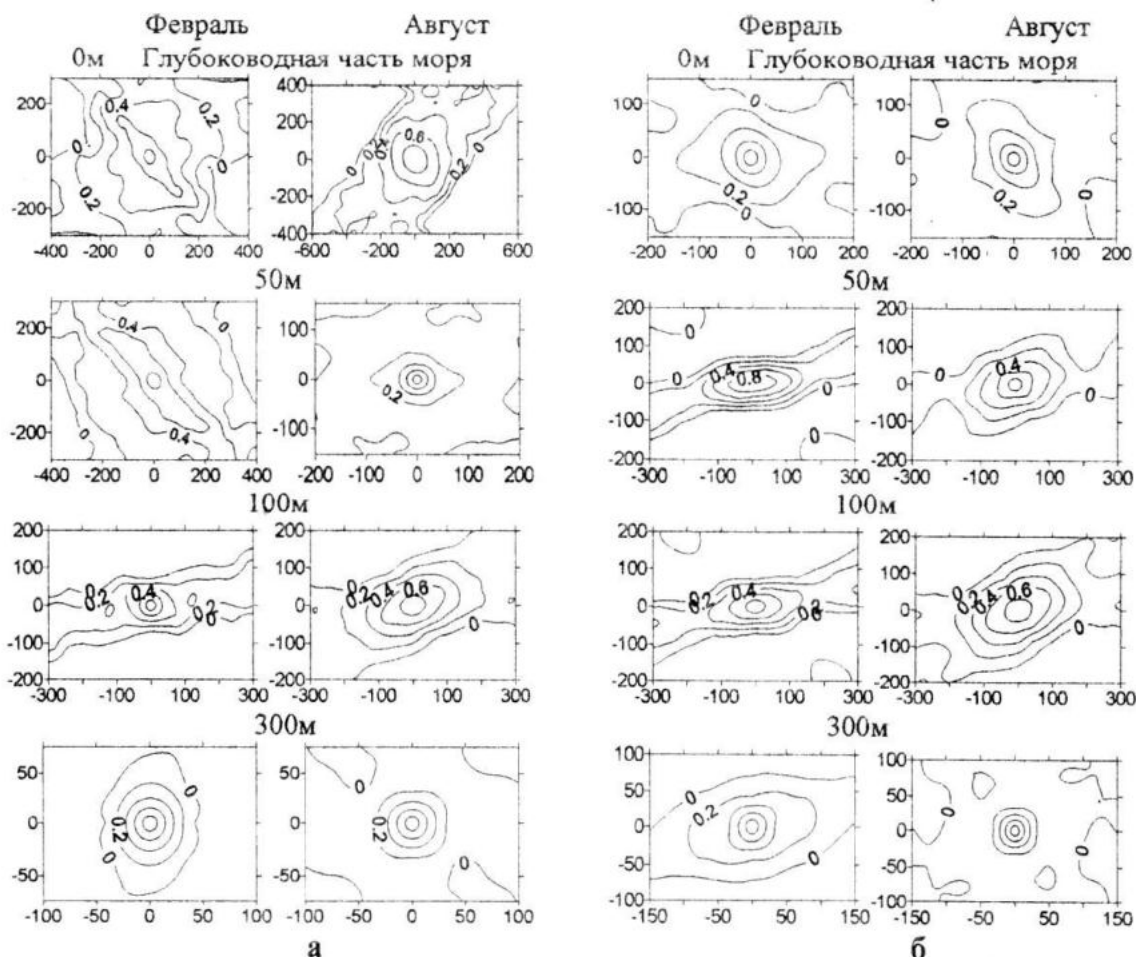


Рисунок 1 – Нормированные автокорреляционные функции полей температуры (а) и солёности (б) по данным февраля и августа на поверхности в глубоководной части моря на горизонтах 50, 100 и 300 метров

В нижнем пикноклине, на горизонте 300 метров, корреляционные функции полей температуры и солёности затухают быстрее, чем на горизонте 100 метров. Статистическая структура поля температуры изотропна во все сезоны. Средний радиус корреляции по данным за февраль составляет порядка 60 км, по данным за август и октябрь увеличивается до 100 км. Корреляционные функции поля солёности анизотропны в зимний и осенний периоды, изотропны в летний. Радиус корреляции увеличивается

от 60 км в летний период до 100-150 км в зимний и осенний периоды.

В верхнем слое моря из-за влияния внешних факторов – стока рек, потоков тепла через поверхность и других - поля температуры и солёности имеют разную пространственную структуру. Поэтому на поверхности и в области холодного промежуточного слоя вид двумерной корреляционной функции поля температуры и двумерной корреляционной функции поля солёности, вычисленных по одной и той же выборке станций, отличаются друг от друга

(рис.1). В слое пикноклина, (под ХПС), корреляционные функции для полей температуры и солености имеют идентичный вид, так как в этом слое моря эти поля в основном имеют одинаковую пространственную структуру вследствие куполообразного строения пикноклина и большей, по сравнению с верхним 50-метровым слоем, изолированности от воздействия внешних факторов. Поэтому для слоя пикноклина достаточно определять корреляционную функцию для одного параметра (или температуры, или солености).

Для оценки неоднородности статистической структуры гидрологических полей на масштабах всего Черного моря корреляционные функции вычислялись отдельно для прибрежных районов, северо-западного шельфа, западной части моря (к западу от 34° в.д.) и восточной части моря (к востоку от 34° в.д.). По данным для летнего периода на поверхности радиус корреляции для полей солености и температуры составляет: в прибрежных районах порядка 50 км; в западной части моря и на северо-западном шельфе 100-150 км; в восточной части до 250 км. В слое пикноклина осредненный по всем направлениям радиус корреляции увеличивается от 50 км в прибрежных районах и 100 км в западной части до 150-200 км в восточной части моря.

**Заключение.** Расчет двумерных корреляционных функций по всей акватории Черного моря показал, что статистическая структура полей температуры и солености является анизотропной. На поверхности поля температуры и солености пространственно неоднородны. Вид корреляционных функций и величина радиуса корреляции различны для шельфовой зоны и внутренней части моря. Анизотропия характерна для полей температуры и солености в области северо-западного шельфа. Корреляционные функции полей температуры и солености во внутреннем районе моря близки к изотропным. Величина радиуса корреля-

ции зависит от сезона. Радиус корреляции уменьшается с глубиной в меридиональном направлении. В слое пикноклина поля температуры и солености характеризуются значительной анизотропией. Радиус корреляции в зональном направлении в 2-3 раза больше, чем в меридиональном направлении. В летний сезон радиус корреляции уменьшается в зональном направлении и увеличивается в меридиональном. Усиление анизотропии в зимний период и ослабление в летний период в слое пикноклина отражает сезонную изменчивость крупномасштабной циркуляции в Черном море.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей – Л.: Гидрометеоиздат, 1963, – 287 с.
2. Беляев В.И., Обработка и теоретический анализ океанологических наблюдений – Киев: Наукова думка, 1973, – 295 с.
3. Нелепо Б.А., Тимченко И.Е. Системные принципы анализа наблюдений в океане – Киев: Наукова думка, 1978, – 222 с.
4. Андрущенко А.А. Статистическая макроструктура гидрологических полей Черного моря и методика их расчета на основе применения оптимальной интерполяции // Автореф. Дис. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук, – Севастополь, МГИ АН УССР, 1975, – 18 с.
5. Белокопытов В.Н., Полонский А.Б. О пространственной статистической структуре термохалинных полей Черного моря // Морские технологии и приборостроение. Тезисы докладов научно-технического семинара, МГИ АН Украины, Севастополь, 1993, – С. 25-26.
6. Григорьев А.В., Иванов В.А., Капустина Н.А. Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // Океанология, 1996, том 36, №3, – С. 364-369.