

**МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО
СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ
1986-2000 гг.**

Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В.

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

По спутниковым данным температуры поверхности Черного моря (ТПМ) 1986-2000 гг. построена аппроксимационная модель среднегодовой ТПМ ($T_{год}$). На ее основе получен положительный тренд осредненной по всей акватории $T_{год}$ равный $+0.007^{\circ}\text{C}/\text{мес}$. Показано, что восточный, центральный и западный районы моря имеют разные величины трендов.

Поле температуры поверхности Черного моря (ТПМ) формируется под воздействием многих физических процессов, главный из которых поглощение падающей солнечной радиации. Распределение солнечной радиации по широте и изменение ее интенсивности в течение года определяют крупномасштабные особенности поля ТПМ размером всей акватории. Климатические факторы, такие как прохождение циклонов над морем, облачность, ветер, а также основное черноморское течение, циклонические и антициклонические вихри поля течений создают поле аномалий ТПМ средних масштабов. Задача состоит в том, чтобы разделить поле ТПМ на основное (фоновое) и поле аномалий с тем, чтобы исследовать пространственно-временную изменчивость этих составляющих отдельно. Такая попытка фильтрации поля ТПМ Черного моря была предпринята в работе [1], однако, поле среднегодовой ТПМ там не рассматривалось.

Построим эмпирическую модель зависимости среднегодовой ТПМ от времени и координат на основе данных спутниковых наблюдений в период 1986-2000 гг. Среднемесячные значения ТПМ для Черного моря на сетке с пространственным шагом 18 км взяты из архива AVHRR Pathfinder Data. Значения температуры в архиве даны до сотых градуса. Измерения температуры проводились радиометрами высокого разрешения на орбитальных спутниках NOAA-7, -9, -11 и -14.

Использование спутниковых данных для изучения ТПМ Черного моря было описано в

работе [2], где среднегодовая ТПМ рассчитывалась равновесным осреднением, как по всей акватории Черного моря, так и отдельно по западному и восточному глубоководным районам моря; там же проведено сопоставление полей ТПМ, полученных со спутников, с полями ТПМ, измеренными контактными методами, которое показало близкое соответствие результатов измерений. Временной тренд среднегодовой ТПМ, осредненной по всей акватории, на интервале 1984-1998 г.г. составил $0.1^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

В отличие от [2] среднегодовую температуру вычисляем методом скользящего среднего. Процедура получения среднегодовых значений ТПМ заключается в следующем. В каждом i -ом узле сетки (где есть измерения ТПМ) с координатами φ_i и λ_i (широта и долгота) акватории Черного моря имеем ряд из 180 среднемесячных значений ТПМ (1986-2000 г.г.) из архива AVHRR Pathfinder Data. Из этого ряда методом равновесного скользящего среднего по 12 точкам, составляющим год, получаем ряд из 169 точек $T_{год,изм}(k,i)$, где k определяет центральный месяц интервала осреднения, i -номер узла сетки ($i=1,2,\dots,1476$). Затем проводим осреднение по всем узлам акватории Черного моря и получаем $T_{год,изм}(k)=(1/n_k)\cdot\sum T_{год,изм}(k,i)$, где n_k -число точек измерений. Зависимость $T_{год,изм}(k)$, представленная на рис 1 кривой 1, имеет ярко выраженный линейный тренд (кривая 2) вида

$$T_{год}(t)=14.53+0.007\cdot t, \quad (1)$$

где t - время в месяцах от января 1990 г. Среднеквадратическое отклонение аппроксимации составляет $\sigma=0.34^{\circ}\text{C}$. Значение линейного коэффициента в пересчете на год $+0.084^{\circ}\text{C}/\text{год}$, что практически совпадает с величиной тренда, найденного в работе [2]. Как видно из анализа временной зависимости $T_{год}(t)$, ее увеличение за 15 лет, составляет $\sim 1.3^{\circ}\text{C}$, а ее положительный тренд отражает реальное повышение температуры поверхности Черного моря за этот период.

Кривая 3 на рис 1 – представляет $P(t)=(1476-n_k(t))/1476\cdot 100\%$ - косвенный показатель облачности над Черным морем, заключающийся в отсутствии данных (среднемесячные ТПМ из-за облачности не удалось получить не только в прибрежных районах, но и на больших площадях глубоководных районов Черного моря). Здесь P - число узлов сетки на акватории Черного моря без измерений температуры в % к общему числу узлов сетки показывает, какую часть площади

ном (3) и есть пространственно-временная модель среднегодовой температуры поверхности Черного моря.

В таблице представлены параметры линейных аппроксимаций по времени коэффициентов полинома (2): $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, c$. Здесь m – величины линейных трендов коэффициентов, Π_0 – свободные члены или величины соответствующих параметров на январь 1990 г., СКО – среднее квадратичное отклонение линейных аппроксимаций коэффициентов полинома (2) от вычисленных по измерениям, Среднее – среднее значение коэффициента за период наблюдений.

Заметим, что найденные значения $m_{a_0}=0.007^\circ\text{C}/\text{мес}$ или $m_{a_0}=0.084^\circ\text{C}/\text{год}$ относятся к «центру» Черного моря, для которого $a_0=0.007 \cdot t + 14.35$. Сравнивая с (1), видим, что величина тренда, найденного простым осреднением измерений среднегодовой температуры по акватории Черного моря, совпадает с величиной тренда, вычисленного по модели (3) для «центра моря».

Таблица. Коэффициенты полинома

П	m_{Π}	Π_0	СКО	Среднее
a_0	0.0071	14.35	0.36	14.65
a_1	0.0003	-0.1869	0.0784	-0.1757
a_2	-0.0001	-0.0381	0.0310	-0.0421
b_1	0.0005	0.0802	0.0339	0.0996
b_2	0	0.0175	0.0055	0.0176
c	$5 \cdot 10^{-5}$	0.0208	0.0138	0.0229

Рассмотрим коэффициенты полинома (3), представленные в табл. Коэффициент a_{10} – отрицателен, тренд m_{a_1} положителен, т.е. с течением времени коэффициент при $\Delta\varphi$ уменьшается по абсолютной величине, оставаясь отрицательным. Коэффициент b_{10} и тренд m_{b_1} положительны, следовательно, коэффициент при $\Delta\lambda$ возрастает с течением времени. Это значит, что за исследуемый период разница между среднегодовыми ТПМ северного и южного берегов моря уменьшилась, а западного и восточного берегов увеличилась.

Если учитывать только линейные зависимости ТПМ от координат в (3), то получим изолинии ТПМ вытянутыми с юго-запада на северо-восток. Учет квадратичных членов полинома (3) приводит к тому, что изолинии $T_{\text{год,М}}$ в западном и восточном районах моря отличаются по характеру: в западном они имеют преимущественно широтный ход, а в

восточном – долготный. Это иллюстрирует рис 2, где приведены карты измеренной $T_{\text{год}}$ (рис 2а,б), вычисленной $T_{\text{год,М}}$ (рис 2в,г) по модели (3) для 1987, 2000 г.г., а также карты аномалий, т.е. разностей $T_{\text{год}} - T_{\text{год,М}}$ (рис 2д,е). Анализ показывает, что среднеквадратичное отклонение измеренных значений $T_{\text{год}}$ от $T_{\text{год,М}}$ не превышает 1°C . Сравнение карт $T_{\text{год}}$ и $T_{\text{год,М}}$ позволяет сделать вывод о том, что построенная модель ТПМ отражает основные черты поведения температурного поля поверхности Черного моря – широтный ход ТПМ в западном глубоководном районе и долготный – в восточном.

Стрелочками на картах рис 2д,е отмечены районы отрицательных (О) и положительных (П) аномалий температуры. Область отрицательных аномалий (до -0.8°C) расположена в восточном глубоководном районе моря, где наблюдаются обычно [3] циклонические вихри. Как показали расчеты, область отрицательных аномалий $T_{\text{год}}$ устойчива во времени, т.е. существует во всем исследуемом интервале, смещаясь время от времени к центру моря и к югу. Устойчивость этой отрицательной аномалии температуры отмечена в работе [2]. Области положительных аномалий температуры расположены в западном глубоководном районе Черного моря и в северо-западном, где наблюдаются антициклонические вихри [4]. Эти области менее устойчивы во времени и пространстве, чем аномалия восточного глубоководного района. Четко выделяются также вдольбереговые аномалии: отрицательная вдоль западного берега Черного моря и положительная – вдоль восточного.

Рис 3 иллюстрирует поле градиентов $T_{\text{год,М}}$ для 1986 г. (рис 3 а,в,д) и 2000 г. (рис 3 б,г,е). На рис 3 а,б представлены карты $T_{\text{год,М}}$ и стрелочками градиенты $\partial T_{\text{год,М}}/\partial n$ (по нормали к изолиниям). Сравнение этих карт позволяет сделать вывод о повышении $T_{\text{год,М}}$ по всей акватории Черного моря за этот период времени. Причем в восточной части моря в 2000 г. по сравнению с 1986 г. увеличился не только модуль градиента (рис 3 в,г), но изменилось и его направление (рис 3 д,е).

В западной части моря модуль градиента $T_{\text{год,М}}$ (рис 3 в,г) возрастает с $0.15^\circ\text{C}/\text{град}$ на юге до $0.45^\circ\text{C}/\text{град}$ на севере в 1986 г. и с $0.1^\circ\text{C}/\text{град}$ на юге до $0.55^\circ\text{C}/\text{град}$ на севере в 2000 г. При этом в западной части моря модуль градиента меняется преимущественно по широте, а в восточной – по долготе. В восточной части моря за этот период изменился не только модуль градиента $T_{\text{год,М}}$

Черного моря покрывала облачность. Так, в 1992 г. P~25 % от общей площади. Сопоставление графиков рис 1 (кривые 1 и 3) показывает, что они находятся в противофазе – увеличение площади, покрытой облаками, вызывает снижение среднегодовой ТПМ. Однако, следует отметить, что высокий коэффициент корреляции (-0.8) между $T_{год}(t)$ и $P(t)$

наблюдается только на интервале 1986–1992 гг., когда облачность покрывала до 25 % акватории. С 1993 г. по 2000 г. коэффициент корреляции между $T_{год}(t)$ и $P(t)$ по абсолютной величине не превышает 0.3. В этом временном интервале измерения среднегодовой ТПМ покрыты почти все узлы сетки.

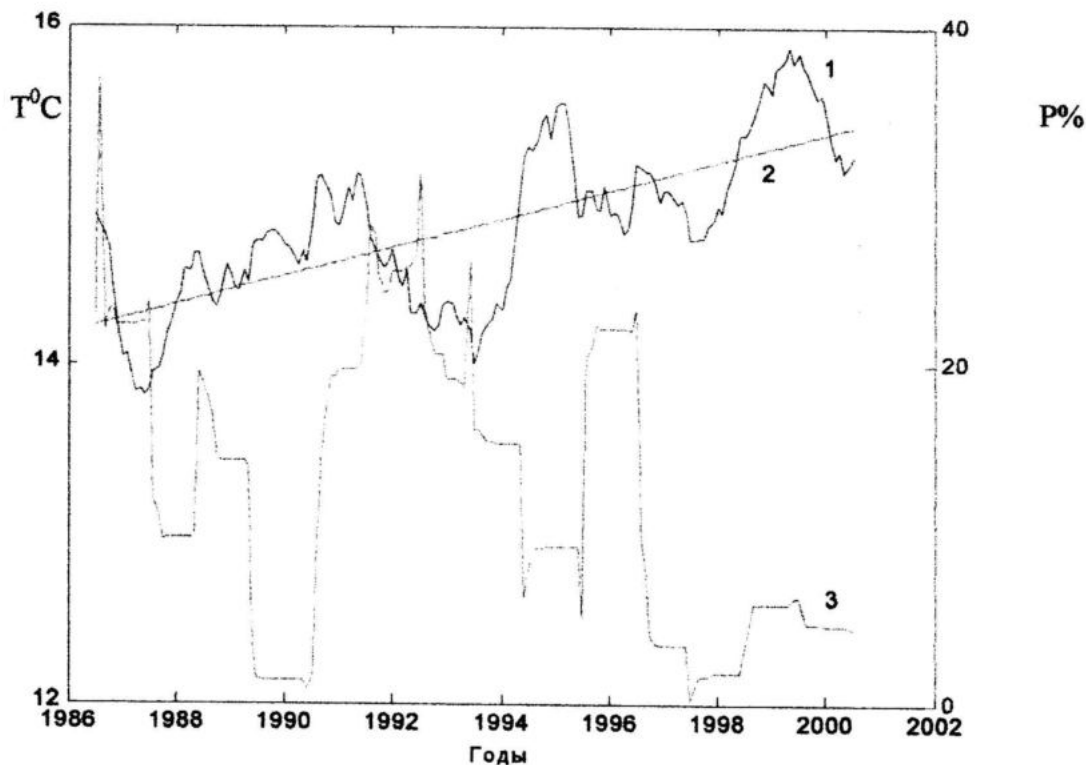


Рис. 1 – 1- средняя по морю среднегодовая ТПМ; 2- аппроксимация ТПМ; 3- площадь моря, покрытая облачностью.

Рассмотрим метод построения аппроксимационной модели ТПМ. Для каждого месяца k составляем матрицы вида:

$$\begin{vmatrix} 1 & \Delta\varphi_1 & \Delta\lambda_1 & \Delta\varphi_1^2 & \Delta\lambda_1^2 & \Delta\varphi_1 \cdot \Delta\lambda_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta\varphi_n & \Delta\lambda_n & \Delta\varphi_n^2 & \Delta\lambda_n^2 & \Delta\varphi_n \cdot \Delta\lambda_n \end{vmatrix} \text{ и } \begin{vmatrix} T(k,1) \\ \vdots \\ T(k,n) \end{vmatrix},$$

где $\Delta\varphi_i = \varphi_i - 43^\circ\text{N}$, $\Delta\lambda_i = \lambda_i - 34^\circ\text{E}$, n -число узлов сетки ($n_{\max} = 1476$), $k = 1, 2, \dots, 169$. Заметим, что из-за облачности величина n варьирует от месяца к месяцу. Точка с координатами (43°N , 34°E) – своеобразный «центр» Черного моря. Далее методом наименьших квадратов по этим парам матриц рассчитываем коэффициенты полиномов второй степени:

$$T_{год,М}(k, \varphi_i, \lambda_i) = a_0(k) + a_1(k) \cdot \Delta\varphi_i + b_1(k) \cdot \Delta\lambda_i + a_2(k) \cdot \Delta\varphi_i^2 + b_2(k) \cdot \Delta\lambda_i^2 + c(k) \cdot \Delta\varphi_i \cdot \Delta\lambda_i, \quad (2)$$

где $T_{год,М}(k, \varphi_i, \lambda_i)$ модельное значение ТПМ для i -ого узла сетки и k -ого месяца. Вычисленная для всех узлов сетки $T_{год,М}(k, \varphi, \lambda)$ представляет собой распределение по Черному морю модельной среднегодовой ТПМ для k -ого месяца. Отклонение $T_{год}(k, \varphi, \lambda) - T_{год,М}(k, \varphi, \lambda)$ характеризует аномалию температурного поля.

Подставим в полином (2) линейные зависимости коэффициентов полинома от времени и вместо (2) запишем

$$T(t, \varphi, \lambda) = (m_{a0} \cdot t + a_{00}) + (m_{a1} \cdot t + a_{10}) \cdot \Delta\varphi + (m_{b1} \cdot t + b_{10}) \cdot \Delta\lambda + (m_{a2} \cdot t + a_{20}) \cdot \Delta\varphi^2 + (m_{b2} \cdot t + b_{20}) \cdot \Delta\lambda^2 + (m_c \cdot t + c_0) \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\lambda, \quad (3)$$

где t – время в месяцах, отсчитываемое от января 1990 г., а $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ – отклонения φ и λ от точки с координатами (43°N , 34°E). Поли-

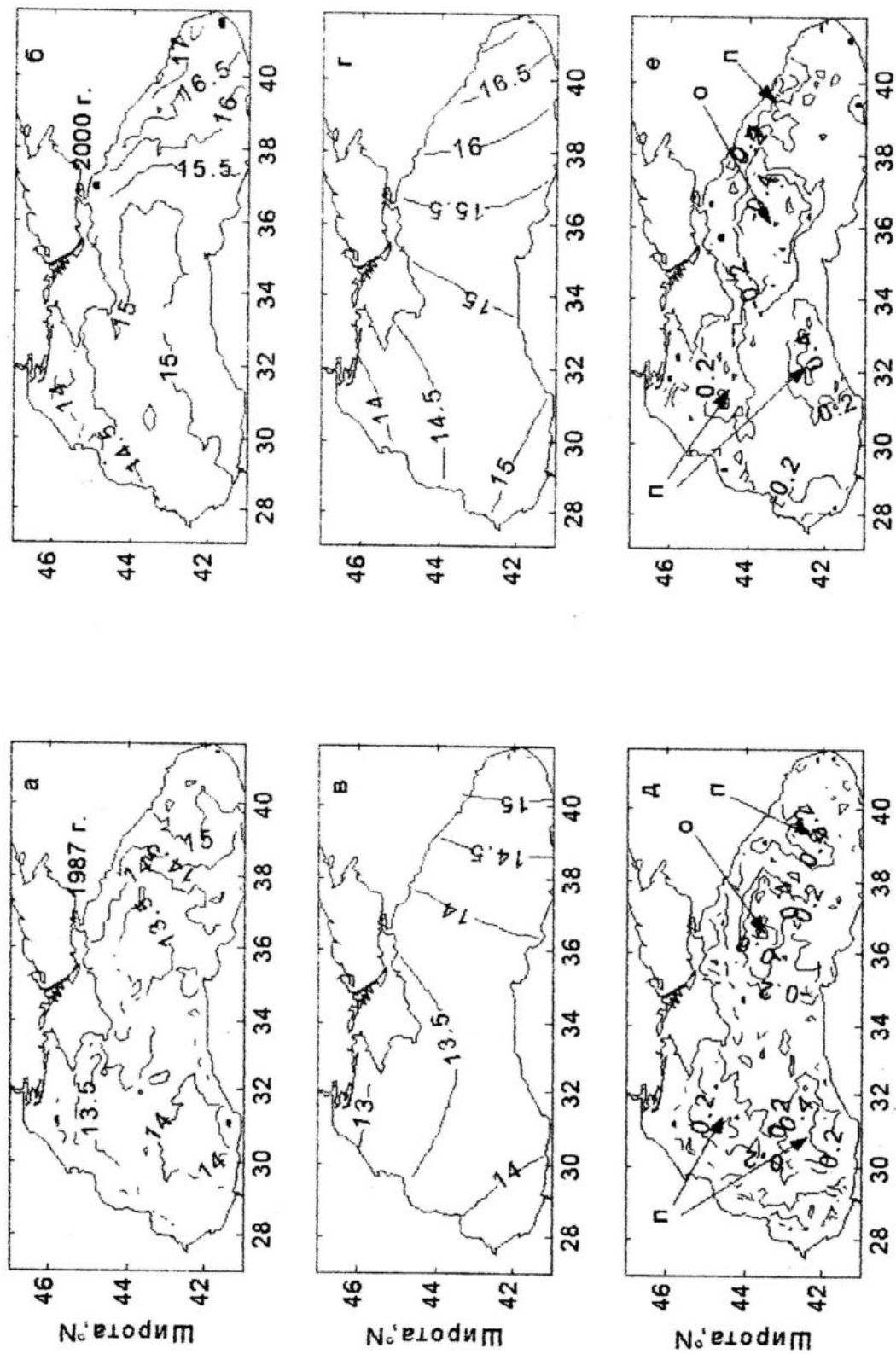


Рис.2 - а,б - Среднегодовая температура $T_{\text{год}}$, в,г - $T_{\text{год}}$ модель, д,е - $T_{\text{год}}$ модель, ф - $T_{\text{год}}$ модель
 Долгота, °E

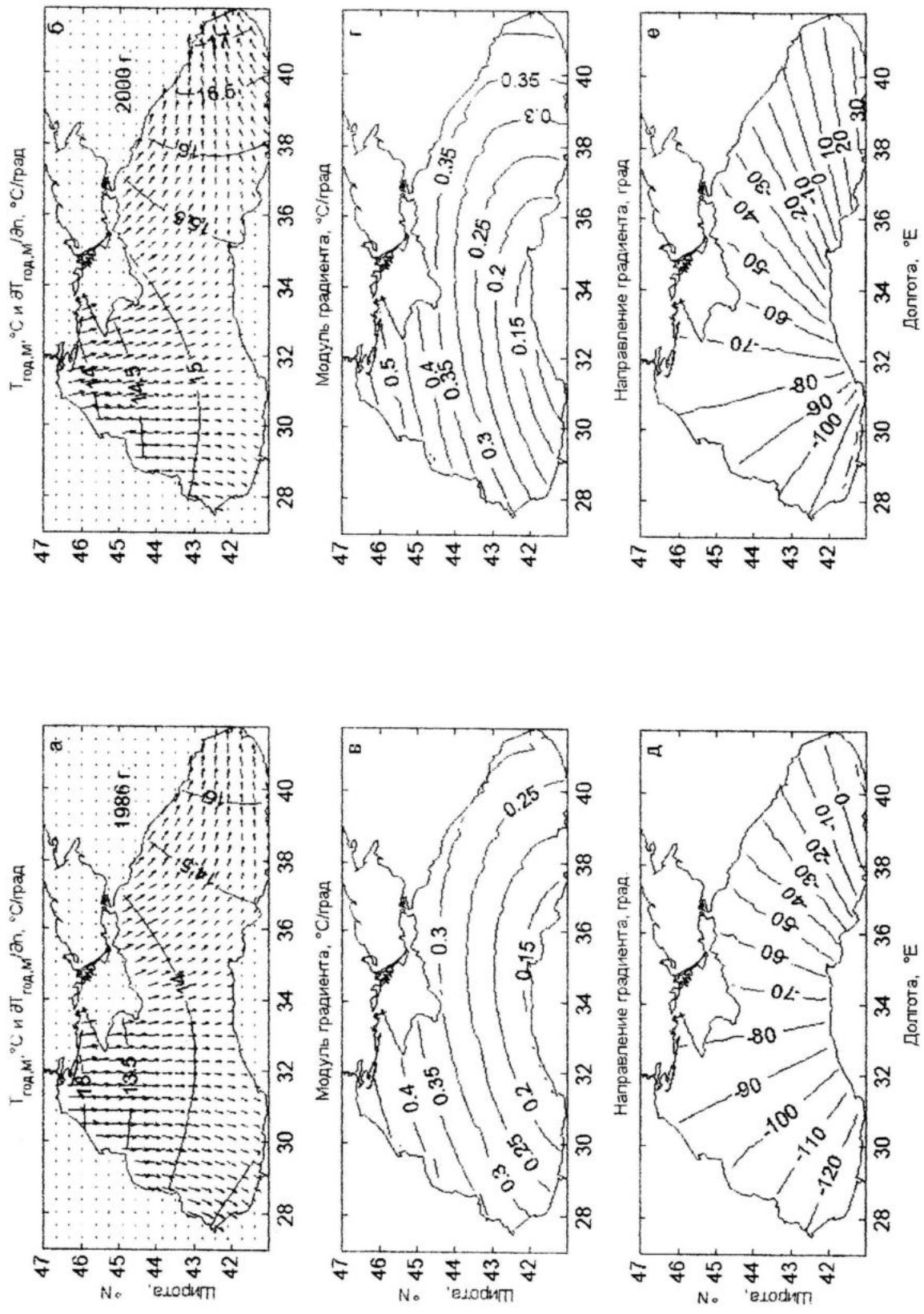


Рис.3 - Среднегодовая температура и ее градиент.

(возрос с $0.3^{\circ}\text{C}/\text{град}$ в 1986 г. до $0.4^{\circ}\text{C}/\text{град}$ в 2000 г.), но и его направление (рис 3 д,е) – с 10° в 1986 г. до 30° в 2000 г.

Таким образом на основе спутниковых данных температуры поверхности Черного моря построена пространственно-временная аппроксимационная модель среднегодовой ТПМ (3), которая удовлетворительно описывает основные особенности распределения поля ТПМ по акватории Черного моря (широтный ход ТПМ в западной части моря и преимущественно долготный ход ТПМ в восточной).

На основе модели дана оценка временного тренда среднегодовой ТПМ в целом по акватории, которая составляет $+0.007^{\circ}\text{C}/\text{мес}$ или $+0.084^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

Анализ построенных карт сглаженной по пространству ТПМ показал существенное отличие временной изменчивости ТПМ по разным районам Черного моря: за 15 лет в юго-западной части Черного моря ТПМ возросла на 0.7°C , в северо-западной – на $\sim 1^{\circ}\text{C}$, в центральной – на $\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ и в восточной – на $\sim 2^{\circ}\text{C}$.

Расчитанные градиенты сглаженных полей ТПМ показали изменение не только

модулей градиентов, но и изменение их направлений особенно существенное в южной области Черного моря.

Резюмируя, можно заключить, что за 15 лет (1986-2000 гг.) наблюдалась тенденция к повышению температуры поверхности Черного моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В. Аппроксимационная модель температуры поверхности Черного моря по спутниковым измерениям 1991-1998 г.г./ Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. Тр., МГИ НАНУ, Севастополь, 2001, С. 369-372.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Об использовании спутниковых данных в исследованиях сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса, 2001, N 1, С.51-61.
3. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения. // Исслед. Земли из космоса, 2000, N 1, С.3-14.