

Академик НАН Украины В. Н. Еремеев, А. Н. Жуков, Н. Е. Лебедев,
В. В. Пустовойтенко, А. А. Сизов

Термические волны Черного моря на межгодовых масштабах

Згідно з супутниковими даними PODAAC JPL AVHRR Pathfinder за 1985–2005 рр. проведено аналіз просторової мінливості температури поверхні Чорного моря на міжрічних масштабах. Показано існування сукупності різномасштабних хвиль у мінливості аномалій поля температури. Вивчено просторову структуру цих хвиль у двох основних напрямках — зональному і меридіональному. За допомогою методів просторової фільтрації виконано розділення та аналіз досліджених коливань по цих напрямках.

Результаты исследований общих свойств изменчивости характеристик спектральной структуры части геофизических процессов по времени и пространству приведены в публикациях [1, 2 и др.]. На этой основе в работе [2] было показано, что поле температуры поверхности Черного моря на межгодовых масштабах является волновым и имеет разномасштабную ячеистую структуру как следствие ортогональности двух основных направлений термических (тепловых) волн — зонального и меридионального.

Аналитические подходы, предложенные в статьях [1, 2], позволяют подробно изучить сложную, полифоническую структуру такого поля. Цель работы авторов настоящего сообщения — исследование особенностей пространственной изменчивости температуры поверхности Черного моря, поиск и выделение устойчивых масштабов такой изменчивости и определение их характеристик. Следует заметить, что в сравнении с ранее опубликованными работами по этой тематике, например [3], такой вариант анализа никем не проводился.

Для этого из архива спутниковых данных PODAAC JPL Pathfinder (<http://roet.jpl.nasa.gov>) брали данные среднемесячной температуры поверхности Черного моря (t_w) за 1985–2005 гг. для ночного времени наблюдений на равномерной сетке 18×18 км; всего использованы 1462 узла сетки в пределах прямоугольника $41,0$ – $46,5^\circ$ с. ш. и $27,9$ – $41,8^\circ$ в. д. (рис. 1). Анализируя особенности межгодовой изменчивости t_w по пространству, из об-

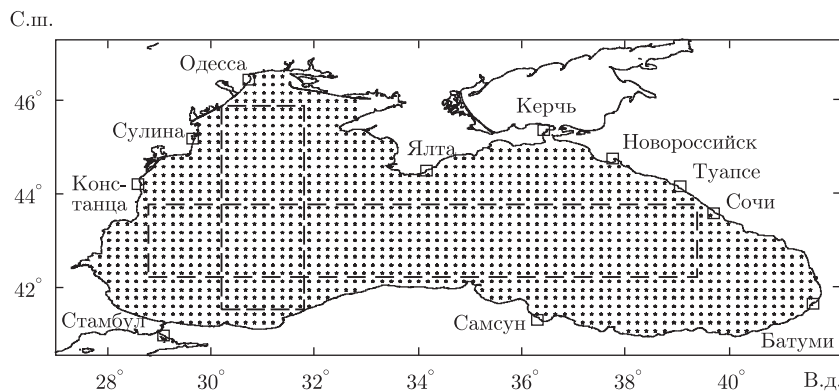


Рис. 1. Расположение узлов сетки 18×18 км спутниковых данных t_w Черного моря

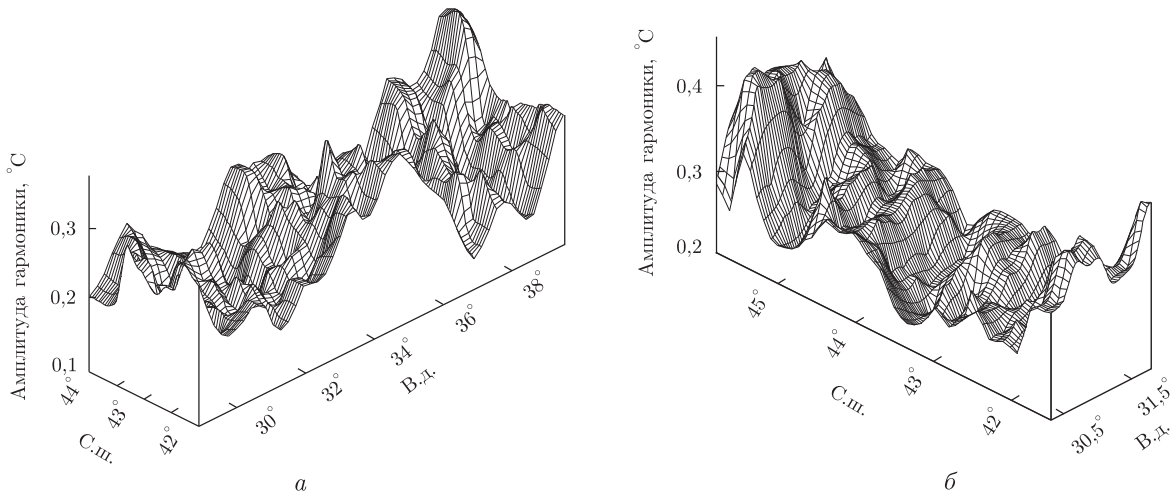


Рис. 2. Участки полей пространственной изменчивости амплитуд гармоник спектров за 21 год с периодами 10,5 лет по оси запад — восток (а) и 5,25 лет по оси север — юг (б)

щей сетки данных нами выделены два участка с координатами 42,2–43,8° с. ш., 28,8–39,4° в. д. (для анализа пространственной ритмодинамики по оси запад — восток) и 41,5–45,9° с. ш., 30,2–31,8° в. д. (аналогично по оси север — юг), показанные штриховыми линиями на рис. 1.

По рядам средних годовых значений t_w для каждого узла на указанных участках были рассчитаны с помощью полного преобразования Фурье соответствующие спектры за 21 год [2]. Для каждой гармоники этих спектров построено поле распределения ее амплитуды по пространству для выделенных участков. Примеры таких полей приведены на рис. 2. С помощью одномерного преобразования Фурье по совокупности зональных и меридиональных разрезов этих полей получены оценки характеристик совокупности выявленных тепловых волн.

Для участка “запад — восток” основная доля энергии (до 70% суммы амплитуд всех гармоник) таких волн приходится на гармоники с длиной волны (λ) 11,2°, 5,6°, 3,7°, 2,8° и 2,2°, т. е. округленно 1150, 570, 380, 290 км и 230 км. Аналогично для участка “север — юг” — это гармоники с λ 4,3°, 2,2°, 1,4° и около 1°, т. е. порядка 440, 220, 150 км и 90–110 км. Для обеих групп волн амплитуды колебаний составляют в среднем от 0,2 до 0,5 °С, т. е. являются значимыми в сравнении с точностью спутниковых измерений.

С учетом полученных результатов была разработана процедура разделения ортогональных составляющих таких волновых полей для изучения пространственной динамики их отдельных колебаний. В качестве основы использовалась известная процедура двумерного спектрального преобразования Фурье [4, 5], модифицированная для фильтрации по пространству с помощью уравнений “авторегрессии — скользящего среднего” [5].

Известно, что двумерный дискретный во времени ряд Фурье (ДВРФ) [5]

$$X_{\text{ДВРФ}}[k, l] = T_1 T_2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x[m, n] \exp\left(-j2\pi \left[\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N}\right]\right) \quad (1)$$

представляет собой периодическую функцию с периодами M и N в соответствующих измерениях. При этом отсчеты непрерывного двумерного сигнала $x(t_1, t_2)$ берутся через ин-

тервалы T_1 по переменной t_1 и через интервалы T_2 по переменной t_2 , образуя последовательность отсчетов $x[m, n] = x[mT_1, nT_2]$.

В процедуре используется возможность разделения аргумента экспоненты в выражении (1) для первоначального вычисления промежуточного массива, что соответствует преобразованию в одном измерении:

$$X_{\text{пр.м}}[m, l] = T_2 \sum_{n=0}^{N-1} x[m, n] \exp\left(-j2\pi \frac{nl}{N}\right). \quad (2)$$

Затем рассчитывается ДВРФ промежуточного массива, что соответствует преобразованию в другом измерении:

$$X_{\text{ДВРФ}}[k, l] = T_1 \sum_{m=0}^{M-1} X_{\text{пр.м}}[m, l] \exp\left(-j2\pi \frac{mk}{M}\right). \quad (3)$$

Приведенные ряды представляют собой строчно-столбцовое разложение двухмерного ДВРФ на два множества операций, которые являются одномерными ДВРФ. В процессе этих операций сначала вычисляется N одномерных преобразований Фурье по строкам массива исходных данных, а затем M преобразований Фурье по столбцам промежуточного массива.

В данном случае при сохранении последовательности и смысла указанных операций была проведена замена представления выходного процесса не в виде ДВРФ, а в виде двухмерного процесса авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) со спектральной плотностью мощности (СПМ):

$$P_{\text{АРСС}}(f_1, f_2) = T_1 T_2 \rho_\omega \left| \frac{B(f_1, f_2)}{A(f_1, f_2)} \right|^2, \quad (4)$$

где

$$A(f_1, f_2) = \sum_m \sum_n a[m, n] \exp(-j2\pi[f_1 m T_1 + f_2 n T_2]);$$

$$B(f_1, f_2) = \sum_m \sum_n b[m, n] \exp(-j2\pi[f_1 m T_1 + f_2 n T_2])$$

определены в заданной опорной области; ρ_ω — дисперсия сигнала $\omega[m, n]$. Если $B(f_1, f_2) = 1$, то СПМ соответствует двухмерному авторегрессионному процессу, а если $A(f_1, f_2) = 1$, то СПМ соответствует двухмерному процессу скользящего среднего. Такая замена дала возможность перейти от количественного расчета СПМ по всем действующим колебаниям к качественному анализу пространственной динамики групп колебаний или избирательно отдельных колебаний.

В работе нами использован второй вариант — в виде скользящего среднего. При этом алгоритм обработки исследуемого поля оставался таким же, как и для ДВРФ. Сначала фильтром скользящего среднего (ФСС) с центральным положением точки осреднения и заданным периодом T_1 обрабатывались строки поля. Это позволяет разделить сигналы на две компоненты — низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ). Каждая из этих компонент выделялась в отдельный массив той же размерности, что и исходное поле. Далее, в зависимости от того, в каком направлении (вдоль какой стороны поля) необходимо было выделить нужное колебание, ФСС с периодом T_2 обрабатывались столбцы НЧ или ВЧ массивов.

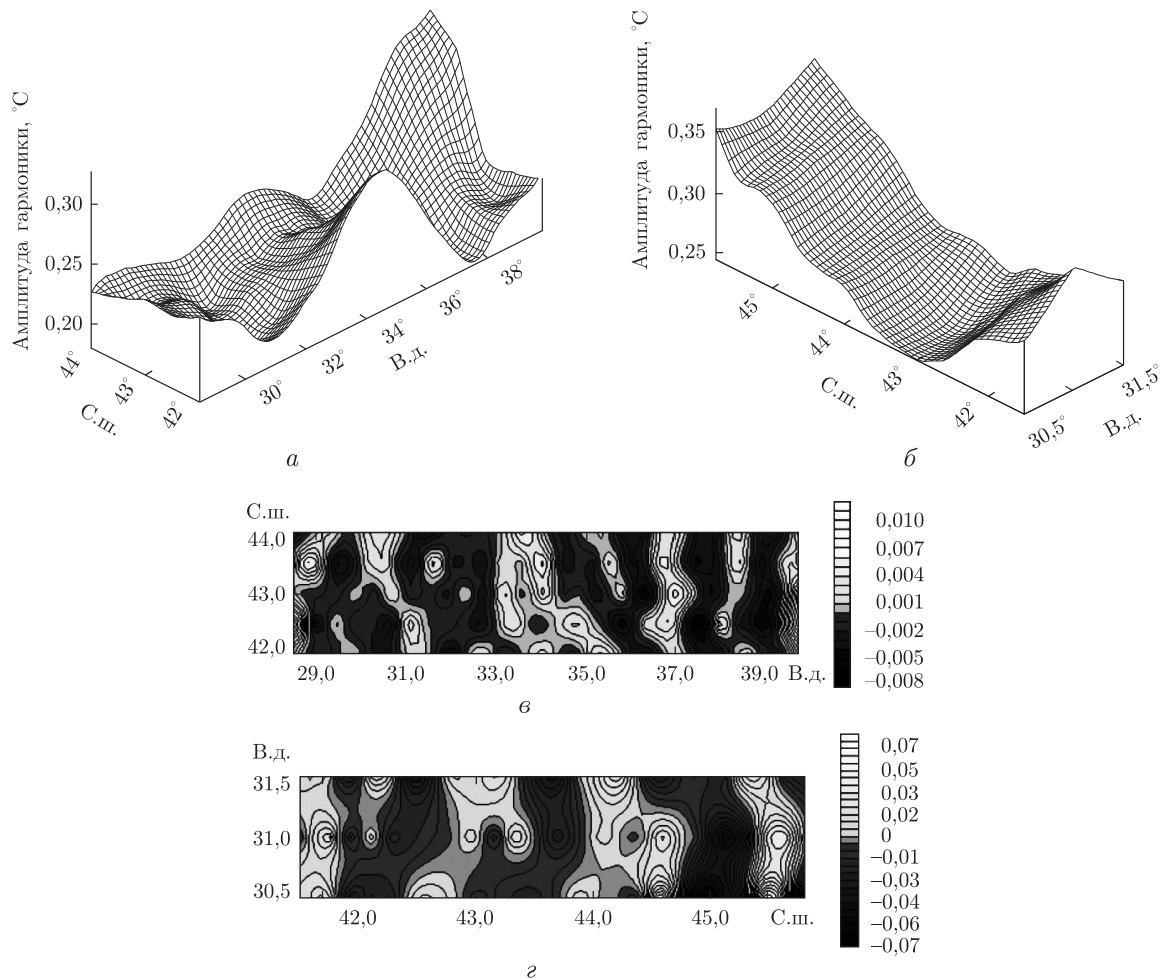


Рис. 3. НЧ и ВЧ составляющие полей изменчивости по пространству амплитуд гармоник спектров среднегодовых значений t_w Черного моря за 21 год по оси запад — восток (НЧ ФСС 3°) с периодом 10,5 лет (а, в) и север — юг (полосовой ФСС $1-2^\circ$) с периодом 5,25 лет (б, г)

В данном случае стороны анализируемых прямоугольных фрагментов полей t_w Черного моря соответствуют зональному и меридиональному направлениям в пространстве. Если для исследований необходимо выделить одно или группу колебаний поля зонального направления, в частности по строкам, то нужно задать с учетом протяженности фрагмента в зональном направлении величину T_1 так, чтобы в выходном сигнале были выделены именно эти колебания. Для этого можно использовать как НЧ и ВЧ, так и полосовые ФСС. При обработке столбцов в нужном результирующем массиве значение T_2 выбирается таким, чтобы в итоговом поле по меридиональному направлению (по столбцам) остались бы только крайне низкие частоты. Если же интерес представляют меридиональные колебания, то параметры фильтрации T_1 и T_2 выбираются обратными.

Примеры результатов такой обработки для указанных выше полей отдельных гармоник спектров рядов t_w Черного моря по каждому узлу сетки спутниковых данных иллюстрирует рис. 3, где показаны колебания вдоль длинных сторон исследованных фрагментов поля t_w , как более обеспеченные результатами наблюдений. Протяженность такой стороны для зонального фрагмента с запада на восток — $11,2^\circ$, для меридионального фрагмента

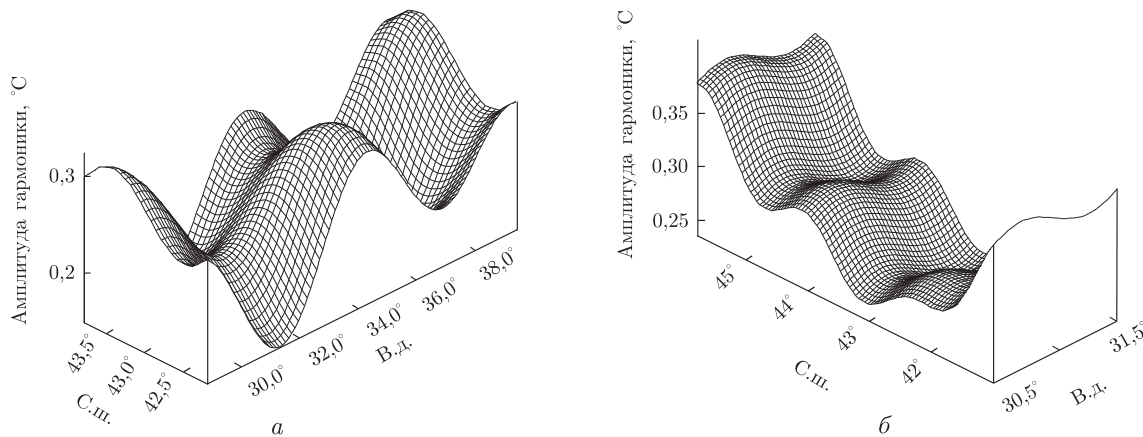


Рис. 4. Результаты обратного ДВПФ (после удаления части пространственных гармоник) для полей изменчивости по пространству амплитуд гармоник временных спектров рядов t_w Черного моря за 21 год для гармоник с периодами 10,5 лет по оси запад — восток (а) и 5,25 лет по оси север — юг (б)

с севера на юг — $4,3^\circ$. Для первого фрагмента был использован НЧ ФСС с периодом 3° , для второго — полосовой ФСС в диапазоне от 1° до 2° .

Амплитуды полученных вследствие фильтрации колебаний, особенно ВЧ, невелики, что характерно для межгодовых масштабов изменчивости. Кроме того, на их величину оказали влияние и особенности амплитудно-частотных характеристик использованных фильтров [5]. Однако все они в основном больше величины погрешности ($0,01^\circ\text{C}$), с которой исходные данные представлены в архиве AVHRR Pathfinder.

Исследования показали, что в НЧ зональных колебаниях для разных временных гармоник поля t_w могут доминировать волны из достаточно широкого диапазона значений λ : от $6,0\text{--}8,0^\circ$ до $25,0\text{--}30,0^\circ$. Необходимо отметить следующее: приведенные величины являются чисто качественными оценками, что соответствует возможностям данного метода. Особенно это относится к наиболее длинным волнам, которые могут быть представлены, например, половиной и даже четвертью волны. В НЧ меридиональных колебаниях для разных гармоник доминантными могут быть значения λ : от $2,5\text{--}3,0^\circ$ до $10\text{--}12^\circ$.

Процедура ФСС была ориентирована на выделение в первую очередь ВЧ колебаний. В их оценках для зональных колебаний преобладают длины волн $2,5\text{--}3,5^\circ$. Для меридиональных колебаний — это волны длиной $1,5\text{--}2,0^\circ$. В обоих случаях на эти колебания заметным образом накладываются более короткие волны длиной $< 1,5^\circ$, отфильтровать которые пока не удастся, что связано с принципиальными сложностями создания качественных полосовых цифровых фильтров на любой известной математической основе, в том числе и скользящего среднего [4, 5].

Одновременно с проведенным анализом по тем же исходным данным были получены спектральные оценки полей гармоник с помощью дискретно-временного преобразования Фурье (ДВПФ) [4]. В двумерных спектрах для зональных волн доминируют значения λ $10,4$, $5,2$, $3,5^\circ$ и $2,6^\circ$, а для меридиональных — $4,2$, $2,1$, $1,4^\circ$ и $1,1^\circ$. Полученные два варианта оценок (ФСС и ДВПФ) совпадают для обоих типов волн с указанными выше результатами обычного одномерного спектрального анализа тех же исходных данных. Подтверждают это и результаты обратного ДВПФ после удаления из двумерных спектров тех составляющих, которые по абсолютной величине были на порядок и более меньше доминант (рис. 4). При этом количество оставшихся пространственных гармоник составляло от 6 до 10.

Сравнение полученных результатов с картинами ритмодинамики аналогичных характеристик атмосферы на территории Северной Евразии [6] показало, что данный механизм формирования изменчивости поля температуры (тепловые волны) единообразно действует для атмосферы и гидросферы не только на региональных, но и на других пространственных масштабах. Это позволяет рассматривать волновое и резонансное взаимодействие в качестве одного из возможных механизмов осуществления связей между макроциркуляционными и региональными процессами функционирования морских систем.

Таким образом, анализ ритмодинамики поля тепловых волн Черного моря, проведенный разными методами, позволил не только выделить отдельные устойчивые колебания разных масштабов, но и определить их характеристики. Разномасштабная, ячеистая структура поля температуры Черного моря является, видимо, одним из основных источников анизотропии его свойств, т. е. пятнистости по пространству. В перспективе ритмодинамический подход и описанные методы пространственного анализа могут быть полезны для поиска взаимосвязей между аномалиями полей геофизических и биогеохимических параметров морских систем.

1. *Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Сизов А. А.* Исследование особенностей ритмодинамики межгодовой изменчивости гидрометеорологических и гидрологических процессов в прибрежных зонах // Докл. АН. – 2006. – **409**, № 2. – С. 254–257.
2. *Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Лебедев Н. Е., Сизов А. А.* Пространственная анизотропия межгодовой изменчивости температуры воды Черного моря (по спутниковым данным) // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 5. – С. 3–10.
3. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Об использовании спутниковых данных в исследованиях сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности Черного моря // Там же. – 2001. – № 1. – С. 51–61.
4. *Канасевич Э. Р.* Анализ временных последовательностей в геофизике : Пер. с англ. – Москва, Недра, 1985. – 300 с.
5. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения : Пер. с англ. – Москва: Мир, 1990. – 584 с.
6. *Еремеев В. Н., Баянжина Т. М., Жуков А. Н. и др.* О волновых свойствах пространственной изменчивости полей температуры воздуха в Северной Евразии на межгодовых масштабах // Доп. НАН України. – 2007. – № 1. – С. 111–116.

*Океанологический центр НАН Украины, Севастополь
Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 06.08.2009

**Academician of the NAS of Ukraine V. N. Eremeev, A. N. Zhukov, N. E. Lebedev,
V. V. Pustovoytenko, A. A. Sizov**

Thermal waves of the Black Sea on interannual scales

Based on the satellite PODAAC JPL AVHRR Pathfinder data for 1985–2005, we analyze the spatial variability of the Black Sea surface temperature on interannual scales. The existence of a whole set of waves of various scales in varying temperature field anomalies is shown. The spatial structure of these waves is studied for two directions – zonal and meridional ones. Division and analysis of the oscillations along these directions are carried out by means of the method of spatial filtration.