

**ВНУТРИГОДОВАЯ  
ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
ХАРАКТЕРИСТИК  
БЕНГЕЛЬСКОГО И ПЕРУАНСКОГО  
АПВЕЛЛИНГОВ**

*А.Е. Букатов, Н.М. Соловей*

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

*На основе архивной базы гидрологических данных (WOD-2009) выполнено исследование закономерностей внутригодовой изменчивости термического индекса апвеллинга, частоты плавучести и характеристик низшей моды внутренних волн в акватории Бенгельского и Перуанского апвеллингов.*

**Введение.** Подъем глубинных вод является объектом многосторонних научных исследований в силу его влияния на гидрологические условия, воздействия на климат и формирование погоды. К наиболее типичным районам прибрежного подъема вод в Южном полушарии относятся зоны Бенгельского и Перуанского апвеллингов, расположенные в районах от 5 до 35° ю.ш. у побережья Западной Африки и от 5 до 25° ю.ш. у западного побережья Южной Америки соответственно. Несмотря на то, что эти апвеллинги расположены у побережий разных континентов, они обнаруживают ряд схожих черт. Вместе с тем, Бенгельский и Перуанский апвеллинги имеют существенные различия, связанные прежде всего с явлением Эль-Ниньо, когда юго-западная часть Тихого океана оказывается под воздействием теплых поверхностных вод [1].

Настоящая работа посвящена изучению и сравнению закономерностей внутригодовой изменчивости термических индексов, частоты плавучести и характеристик низшей моды внутренних волн в районах Бенгельского и Перуанского апвеллингов.

**Материалы и методика.** В качестве исходных данных использовались массивы реальных значений температуры и солёности WOD – 2009) [2]. Первичная обработка данных проводилась с помощью программы “Ocean Data View” [3].

Для исследования был выбран временной промежуток с 1911 по 2009 год.

Массив фактических гидрологических данных для акватории исследования Бенгельского апвеллинга содержит более 30000 станций, для Перуанского – более 50000.

Для исследования внутригодовой изменчивости апвеллингов были рассчитаны их термические индексы (ТИА). Методика расчёта ТИА изложена в работах [4, 5].

По реальным значениям температуры и солёности рассчитывалась плотность. Массив плотности анализировался на предмет выявления инверсий, затем корректировался путём замены инверсионных величин значениями, интерполированными по соседним горизонтам [6].

Также по фактическим данным рассчитывались значения максимумов частоты Вайсяля-Брента ( $N_{\max}$ ) и глубины их залегания ( $hN_{\max}$ ). Затем эти значения приводились к узлам полуградусной сетки путём аппроксимации методом kriging.

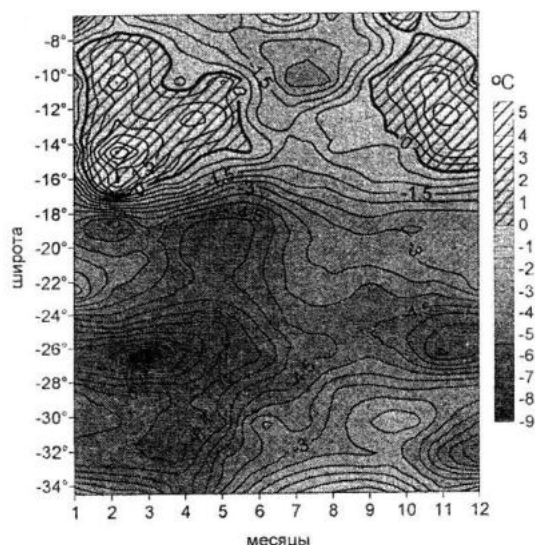
Исследование внутренних волн проводилось исходя из системы линейных уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости в форме Филельдстада [7, 8], которая сводилась к задаче типа Штурма-Лиувилля для амплитудной функции  $W(z)$  вертикальной составляющей скорости. Задача решалась методом, основанным на решении характеристического уравнения для матрицы системы алгебраических уравнений [9]. Численные расчёты вертикального распределения  $W(z)$  проводились для заданной длины волны  $L=30$  км. Определялась глубина залегания максимума вертикальной составляющей скорости ( $hW_{\max}$ ) и соответствующий собственный период ( $T$ ) первой моды внутренних волн. Для анализа сезонной изменчивости рассчитываемых характеристик и её согласованности с внутригодовым циклом термического индекса апвеллинга рассматривались величины, полученные на широтном удалении 100 и 500 км от берега с шагом  $2^\circ$  по меридиану.

**Анализ результатов.** Распределение термического индекса апвеллинга показывает, что по характеру внутригодовой

изменчивости ТИА в районе Бенгельского апвеллинга выделяются 2 зоны (рис. 1):

1) между  $6^{\circ}$  и  $17^{\circ}$  ю.ш. – сезонный апвеллинг. Подъём вод наблюдается здесь с июня по сентябрь, значения модуля термического индекса (МТИА) не превышают  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

2) между  $17^{\circ}$  и  $34^{\circ}$  ю.ш. – зона круглогодичного апвеллинга с максимальной интенсивностью на  $26,5^{\circ}$  ю.ш. в районе ячейки Людериц. Термический индекс апвеллинга изменяется здесь от  $-9^{\circ}\text{C}$  в феврале – апреле до  $-4^{\circ}\text{C}$  в августе – сентябре.



Р и с. 1. Пространственно-временное распределение термического индекса Бенгельского апвеллинга ( $^{\circ}\text{C}$ )

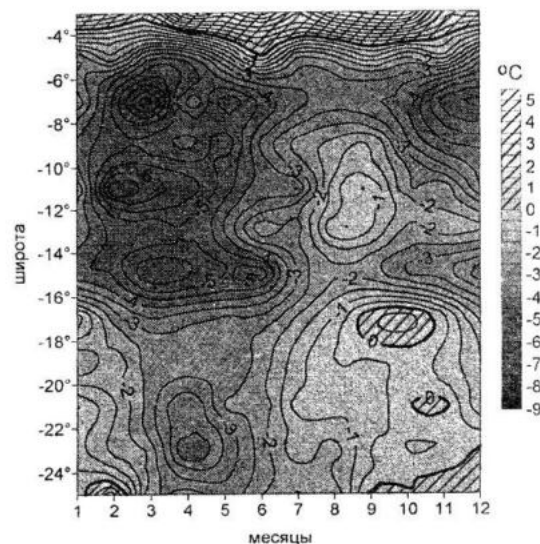
В районе Перуанского апвеллинга также выделяются 2 зоны (рис. 2):

1) между  $5^{\circ}$  и  $17^{\circ}$  ю.ш. – зона круглогодичного апвеллинга. Интенсивный подъём вод здесь наблюдается с января по июнь месяц (значения модуля термического индекса достигают  $7^{\circ}\text{C}$ ). С июля по декабрь апвеллинг ослабевает, минимальные значения модуля ТИА – в июле, августе месяце не превышают  $3^{\circ}\text{C}$ .

2) между  $17^{\circ}$  и  $25^{\circ}$  ю.ш. – зона сезонного апвеллинга. Подъём вод наблюдается здесь с января по сентябрь, значения МТИА не превышают  $3,5^{\circ}\text{C}$  (март, апрель). С сентября по декабрь апвеллинг прекращается.

Поскольку термический индекс апвеллинга является параметром, характеризующим интенсивность подъёма глубинных вод, то очевидно, что Бенгельский апвеллинг является более интенсивным (значения модуля термического индекса достигают  $9^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с Перуанским апвеллингом (максимальное значение МТИА –  $7^{\circ}\text{C}$ ).

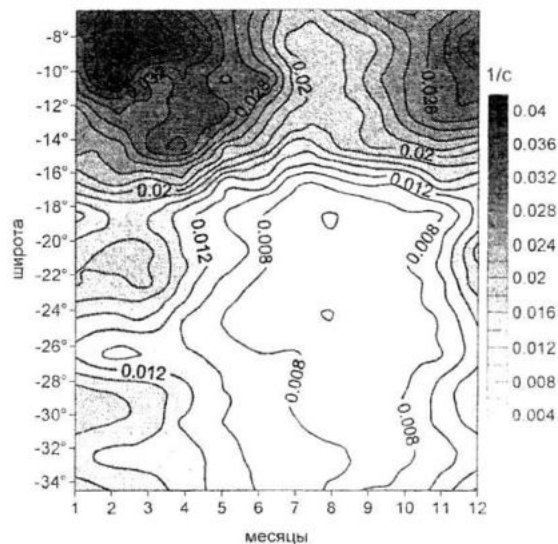
Анализ внутригодовой изменчивости максимума частоты Вьясяля-Брента непосредственно в районе поднятия вод (на широтном удалении 100 километров от берега) показал, что наибольшие значения максимума частоты плавучести наблюдаются с ноября по май месяц, наименьшие – с июня по октябрь как в зоне Бенгельского (рис. 3) так и в зоне Перуанского (рис. 4) апвеллинга.



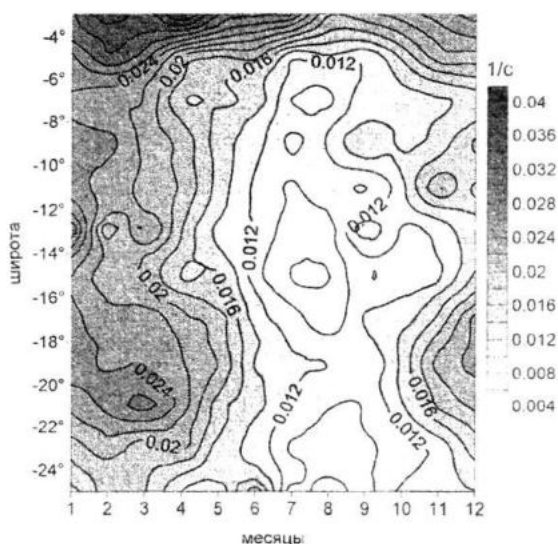
Р и с. 2. Пространственно-временное распределение термического индекса Перуанского апвеллинга ( $^{\circ}\text{C}$ )

Наибольшие значения максимума частоты плавучести по глубине отмечают в тех ячейках и в те временные интервалы, когда апвеллинг ослабевает или отсутствует полностью. Причём, для Бенгельского апвеллинга эта особенность выражена более чётко, чем для Перуанского.

Подобный эффект имеет место и для Канарского апвеллинга. Там в полосе интенсивного сезонного апвеллинга наибольшие значения  $N_{\text{max}}$  наблюдаются также в месяцы, когда апвеллинг прекращается [4].



Р и с. 3. Внутригодовая изменчивость  $N_{\max}$  (1/с) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

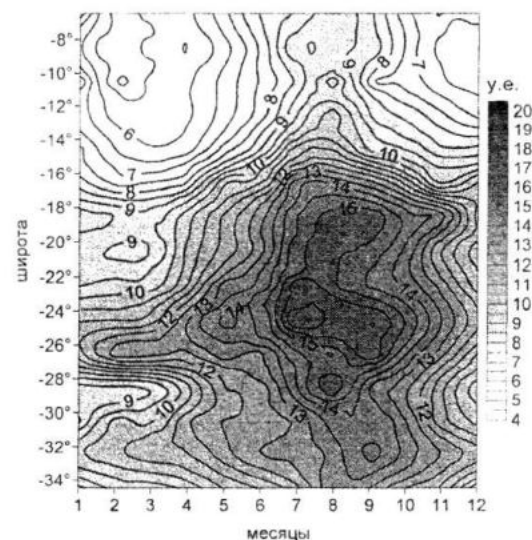


Р и с. 4. Внутригодовая изменчивость  $N_{\max}$  (1/с) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

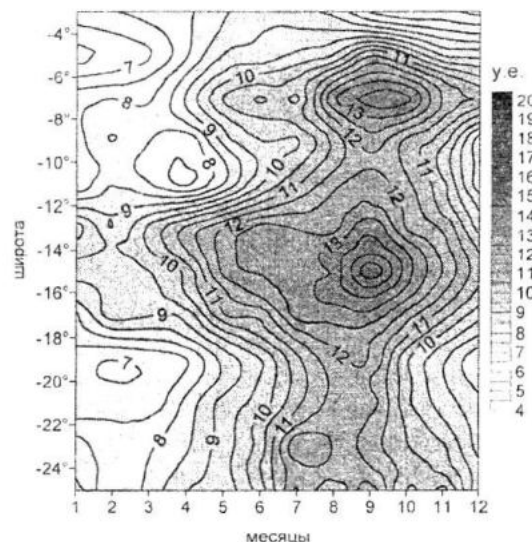
Исследовалась также внутригодовая изменчивость максимума вертикальной составляющей скорости первой моды и периодов свободных внутренних волн. Наибольшие значения  $W_{\max}$  и  $T$  отмечаются с июня по ноябрь месяц, наименьшие – с ноября по май и для Бенгельского (рис. 5, 7) и для Перуанского (рис. 6, 8) апвеллингов.

В полосе сезонного апвеллинга в месяцы, когда апвеллинг отсутствует (с ноября по май), наблюдаются самые короткопериодные внутренние волны.

Самые большие значения периода колебаний отмечаются в ячейке максимальной интенсивности Бенгельского апвеллинга на  $26,5^{\circ}$  ю.ш. и в ячейках максимального развития Перуанского апвеллинга ( $7^{\circ}$  и  $13^{\circ}$  ю.ш.) в месяцы, когда интенсивность подъёма вод ослабевает (с июня по ноябрь).



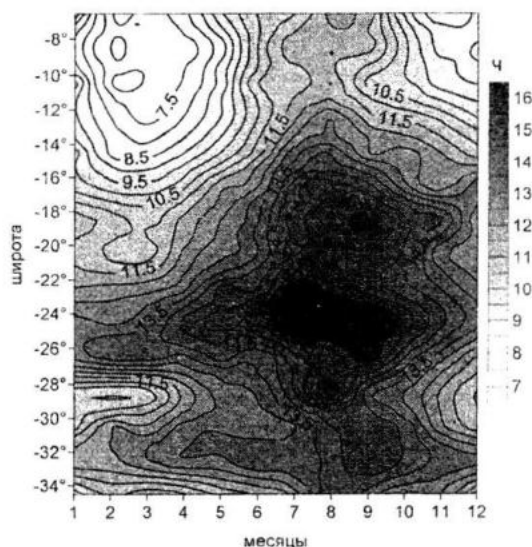
Р и с. 5. Внутригодовая изменчивость  $W_{\max}$  (у. е.) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега



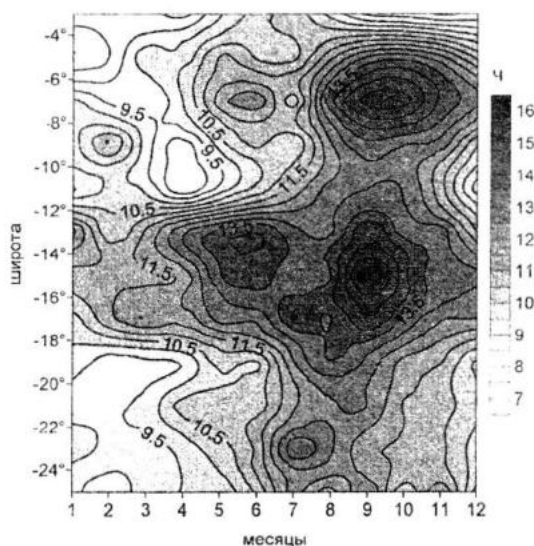
Р и с. 6. Внутригодовая изменчивость  $W_{\max}$  (у. е.) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

Для каждого месяца года рассчитывались коэффициенты корреляции ( $K_{\text{кор}}$ ) между значениями  $N_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $T$  и МТИА (рис. 9, 10).

Необходимо отметить, что корреляционные взаимосвязи характеристик  $N_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $T$  и МТИА более ярко выражены для Бенгельского апвеллинга, чем для Перуанского. Коэффициенты корреляции для всех месяцев года (непосред-



Р и с. 7. Внутригодовая изменчивость  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

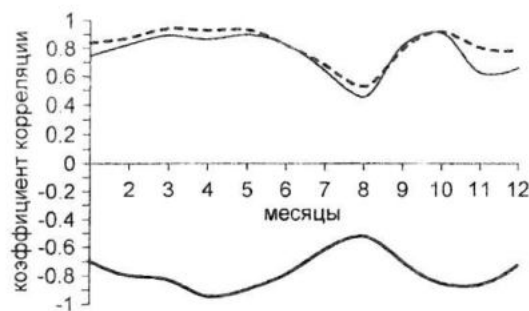


Р и с. 8. Внутригодовая изменчивость  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

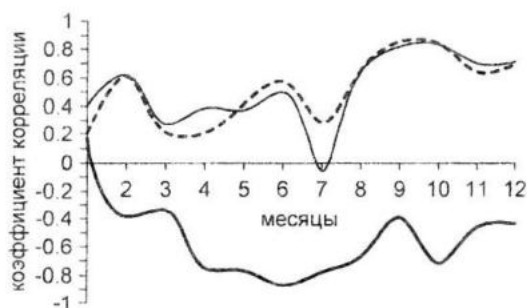
ственно в зоне апвеллингового движения вод – на широтном удалении 100 километров от берега) для Бенгельского апвеллинга составляют 0,8 – 0,9 по модулю, за исключением августа, когда абсолютное значение  $K_{\text{кор}}$  ( $|K_{\text{кор}}|$ ) равно 0,5. Для Перуанского апвеллинга только в

отдельные месяцы  $|K_{\text{кор}}|$  равен 0,7 – 0,8 (апрель – июль, октябрь), в остальные месяцы он статистически мало значим.

Анализ корреляционной связи глубин залегания максимума частоты плавуности и максимума вертикальной составляющей скорости внутренних волн с ТИА показал, что между этими величинами существует слабое соответствие. Коэффициенты корреляции между этими параметрами статистически мало значимы как для Бенгельского так и для Перуанского апвеллинга (рис. 11, 12).



Р и с. 9. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $N_{\max}$  и МТИА (сплошная толстая линия),  $W_{\max}$  и МТИА (штриховая),  $T$  и МТИА (сплошная тонкая) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

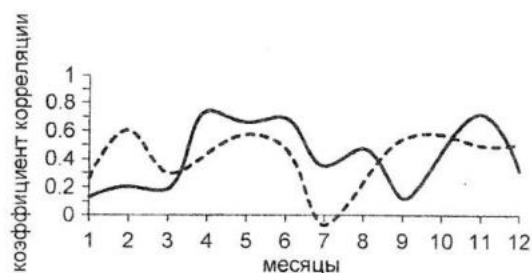


Р и с. 10. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $N_{\max}$  и МТИА (сплошная толстая линия),  $W_{\max}$  и МТИА (штриховая),  $T$  и МТИА (сплошная тонкая) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

На рис. 13 и 14 представлена внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $N_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $T$  и МТИА на широтном удалении 500 километров от берега для Бенгельского и Перуанского апвеллингов, из которых видно, что не наблюдается чёткой взаи-

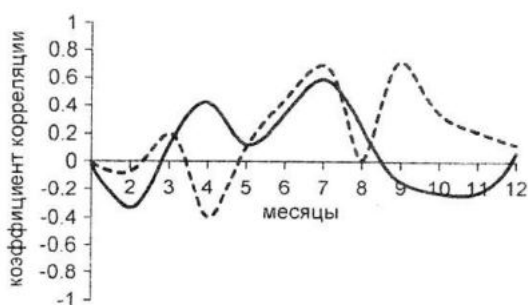


мосвязи между этими параметрами.  $|K_{кор}|$  составляет 0,8 только в апреле месяце для Бенгельского апвеллинга. В остальные месяцы он значительно меньше.



Р и с. 11. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $hN_{max}$  и ТИА (сплошная линия),  $hW_{max}$  и ТИА (штриховая) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

Следовательно, с удалением к периферии апвеллинговых зон влияние подъёма вод на волновые возмущения ослабевает.

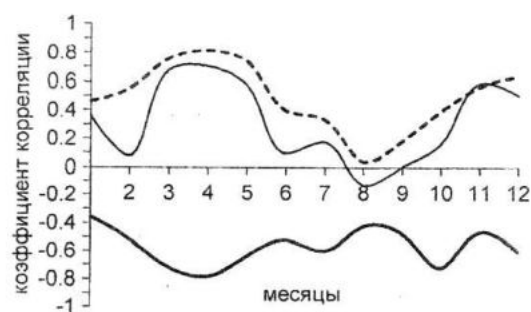


Р и с. 12. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $hN_{max}$  и ТИА (сплошная линия),  $hW_{max}$  и ТИА (штриховая) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 100 км от берега

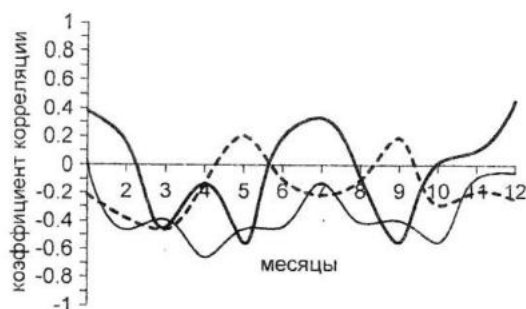
Рис. 15 и 16 иллюстрируют сезонную изменчивость коэффициентов корреляции между  $hN_{max}$ ,  $hW_{max}$  и ТИА на периферии апвеллинговых зон.

Видно, что для Бенгельского апвеллинга коэффициенты корреляции имеют несколько большие значения и в отдельные месяцы (март, сентябрь) достигают величин 0,7-0,8. Однако это не даёт оснований сделать вывод, что между этими

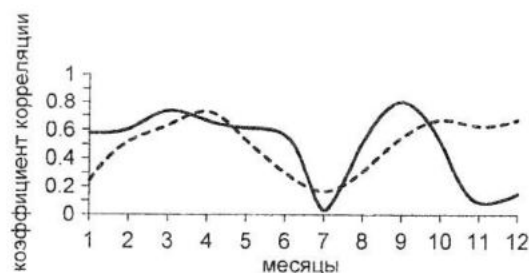
параметрами существует устойчивая корреляционная взаимосвязь.



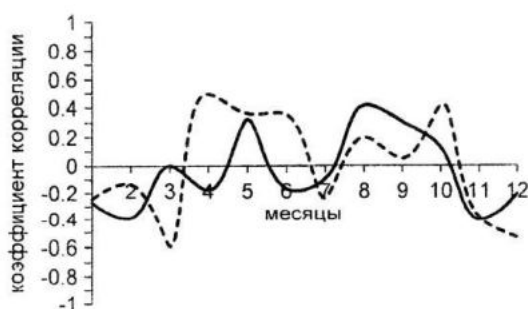
Р и с. 13. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $N_{max}$  и МТИА (сплошная толстая линия),  $W_{max}$  и МТИА (штриховая), Т и МТИА (сплошная тонкая) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 500 км от берега



Р и с. 14. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $N_{max}$  и МТИА (сплошная толстая линия),  $W_{max}$  и МТИА (штриховая), Т и МТИА (сплошная тонкая) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 500 км от берега



Р и с. 15. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $hN_{max}$  и ТИА (сплошная линия),  $hW_{max}$  и ТИА (штриховая) в зоне Бенгельского апвеллинга на широтном удалении 500 км от берега



Р и с. 16. Внутригодовая изменчивость коэффициентов корреляции между  $hN_{\max}$  и ТИА (сплошная линия)  $hW_{\max}$  и ТИА (штриховая) в зоне Перуанского апвеллинга на широтном удалении 500 км от берега

**Заключение.** Таким образом, по архивным гидрологическим данным для районов Бенгельского и Перуанского апвеллингов выполнено исследование сезонной изменчивости термического индекса апвеллинга, частоты плавучести и характеристик низшей моды внутренних волн.

Показано, что по характеру внутригодовой изменчивости термического индекса апвеллинга как в районе Бенгельского так и в районе Перуанского апвеллинга выделяются 2 зоны: зона сезонного и зона круглогодичного апвеллинга.

Выявлено, что наибольшие значения максимума частоты плавучести наблюдаются с ноября по май месяц, наименьшие — с июня по октябрь как в зоне Бенгельского так и в зоне Перуанского апвеллинга.

Установлено, что  $|K_{\text{кор}}|$  между  $N_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $T$  и ТИА для всех месяцев года непосредственно в зоне подъема вод для Бенгельского апвеллинга составляют 0,8 – 0,9 за исключением августа, когда коэффициент корреляции равен 0,5. Для Перуанского апвеллинга только в отдельные месяцы  $|K_{\text{кор}}|$  достигает значения 0,8 (апрель – июль, октябрь), а в остальные месяцы года он значительно меньше.

С удалением к периферии апвеллинговых зон влияние подъема вод на волновые возмущения ослабевает.

Значимая корреляционная взаимосвязь между термическим индексом апвеллинга и глубинами залегания макси-

мумов частоты плавучести и вертикальной составляющей скорости первой моды внутренних волн и как для Бенгельского так и для Перуанского апвеллинга не выявлена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фёдоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 296 с.
2. *World Ocean Database 2009*, <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>
3. Reiner Schlitzer, "Ocean Data View", <http://www.awi-de/GEO/ODV/>
4. Ю.В. Артамонов, А.Е. Букатов, Н.М. Соловей. Исследование сезонной изменчивости частоты Вьясяля-Брента в районе Канарского апвеллинга по данным контактных измерений. // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАНУ, 2007. — С. 170 – 172.
5. П.П. Чернышков, А.М. Сирота, Е.Н. Тимохин. Структура и динамика вод в районах Канарского и Бенгельского апвеллингов в Атлантическом океане и их влияние на популяции пелагических рыб. — Калининград: АтлантНИРО, 2005. — 195 с.
6. Ю.В. Артамонов, А.Е. Букатов, Н.М. Соловей. Сезонная изменчивость глубины залегания максимума частоты Вьясяля-Брента в Атлантическом океане // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАНУ, 2004. — С. 217 – 219.
7. В. Краусс. Внутренние волны. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 272 с.
8. Ю.З. Миропольский. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 302 с.
9. В.А. Гриценко, В.П. Красицкий. Об одном способе расчёта дисперсионных соотношений и собственных функций внутренних волн в океане по данным натурных измерений // Океанология. — 1982, т. 22, вып. 4. — С. 546 – 549.