

# МОНИТОРИНГ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЕЙ

УДК 551.465

И.Г.Шокурова, Т.В.Пластун, В.Н.Белокопытов, А.Х.Халиулин

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Рассматривается внутригодовая и многолетняя изменчивость температуры, солености в слое 0 – 100 м и доступной потенциальной энергии в слое 0 – 50 м на северо-западном шельфе Черного моря в сравнении с центральной глубоководной частью моря, ограниченной изобатой 100 м. Для исследования внутригодовой изменчивости используется климатический массив данных с 1910 г., многолетней изменчивости – данные августа за десятилетние периоды с пятилетним сдвигом с 1951 по 1995 гг. Показано, что в междесятилетней изменчивости в верхнем 100 м слое имеют место статистически значимые изменения температуры и солености, как на шельфе, так и в центральной части моря.

**Введение.** Северо-западный шельф Черного моря представляет собой мелководную часть моря, наиболее подверженную влиянию внешних факторов – атмосферного воздействия, речного стока и антропогенных нагрузок. В акваторию шельфа поступает около 80 % суммарного речного стока в Черное море [1]. Колебания стока рек, изменчивость ветрового режима, характер циркуляции вод, зимнее выхолаживание и летний прогрев прибрежных мелководных районов определяют значительную изменчивость гидрологической структуры этого района [2].

Изучение изменчивости гидрологических характеристик северо-западного шельфа актуально в связи обострившейся экологической ситуацией в данном районе [3]. Также, к настоящему времени значительно пополнился банк данных Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины [4], что позволяет проводить новые, более детальные исследования в Черном море.

В настоящей работе рассматривается внутригодовая и междесятилетняя изменчивость температуры, солености в слое 0 – 100 м и доступной потенциальной энергии (ДПЭ) в верхнем 50 м слое на шельфе в сравнении с аналогичными показателями центральной части моря, ограниченной изобатой 100 м.

В качестве границы исследуемого района северо-западного шельфа выбраны: 43°23' с.ш. (м.Калиакра), 34° в.д. и изобата 100 м. Акватория района составляет 16 % от акватории всего моря. Акватория, ограниченная 100 м изобатой, составляет 76 % от общей площади моря.

Внутригодовая изменчивость температуры и солености в Черном море исследовалась во многих работах [1, 2, 5, 6]. Для исследования межгодовой изменчивости по всей акватории Черного моря нет достаточного количества

© И.Г.Шокурова, Т.В.Пластун, В.Н.Белокопытов, А.Х.Халиулин, 2004

данных. Данные распределены неравномерно как по времени, так и по пространству. Возможны исследования межгодовой изменчивости для отдельных небольших районов Черного моря, что было выполнено в [1, 5], для северо-западной части Черного моря – в [1, 7, 8].

В то же время представляют интерес получение оценок многолетней изменчивости по всему морю и сравнительный анализ изменчивости в отдельных районах. Для этих целей использовались данные августа за десятилетние периоды с пятилетним сдвигом и оценивалась междесятилетняя изменчивость температуры и солёности.

Многолетнюю изменчивость температуры и солёности в Черном море связывают с факторами, действующими на поверхности моря, – ветровое воздействие, потоки тепла, массы (испарение, осадки), а также с факторами, локализованными в пространстве – речной сток, водообмен через проливы [5].

На шельфе многолетнюю изменчивость термохалинной структуры также связывают с вариациями стока рек [1, 7], с изменчивостью средних сезонных значений температуры воздуха [8].

Внутригодовая изменчивость ДПЭ в Черном море оценивалась в [1, 9, 10]. Было показано, что существует сезонный ход изменчивости ДПЭ в слое постоянного пикноклина с максимальными значениями в марте – апреле и минимальными в августе – октябре. Оценки многолетней изменчивости ДПЭ были получены по данным августа в слое 50 – 300 м в [10].

**Данные и методы исследования.** Используется массив данных по температуре и солёности банка данных МГИ, содержащий измерения с 1890 г. Для расчета внутригодовой изменчивости используется 39500 станций на акватории шельфа, 40600 станций в центральной части моря, ограниченной изобатой 100 м, 102000 станций по всей акватории моря. Для исследования многолетней изменчивости используются данные за десятилетние периоды с пятилетним сдвигом с 1951 по 1995 гг., за август: 4900 станций на шельфе, 4800 станций в центральной части моря, 12000 станций по всей акватории моря.

Расчеты проводились для следующих горизонтов: 0; 10; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 120 м для внутригодовой изменчивости и 0; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 75; 80; 90; 100; 120 м для многолетней изменчивости.

Поля температуры и солёности на стандартных горизонтах по климатическим и десятилетним данным рассчитывались методом оптимальной интерполяции [11, 12]. Значения вычислялись в узлах сетки с шагом 5' по широте и 8.57' по долготе (5 × 5 миль). Для удаления мелко и мезомасштабных неоднородностей полученные поля температуры и солёности сглаживались по формуле:

$$x(i, j) = \sum_{k, m = -n+1}^{n-1} x(i+k, j+m) \cdot f(k, m),$$

где  $x(i, j)$  – значение температуры или солёности в точке сетки с координатами  $i$  и  $j$ ,  $f(k, m) = 1 - \left( k^2 + m^2 \right) / n^2$ ,  $f(k, m) \geq 0$  – пространственный фильтр,  $n$  – количество точек сетки, попадающих в радиус сглаживания. Сглаживание проводилось при  $n = 5$ , то есть с радиусом в 25 миль.

**Изменчивость температуры и солёности.** В пространственной структуре полей температуры и солёности шельфа отмечается значительная изменчивость. При этом, как показано в [2], главными определяющими факторами являются объем и условия распространения в море речного стока, характер циркуляции вод, величина прогрева поверхности моря и вертикальная стратификация слоев воды.

Вследствие неоднородности гидрологических полей для сравнения изменчивости гидрологических характеристик используются не только осредненные на горизонтах по выбранным районам значения, но и осредненные значения в слое 0 – 50 м. Осредненные в слое значения солёности и температуры могут также служить показателями изменчивости солесодержания и теплосодержания вод моря.

**Внутригодовая изменчивость.** Как уже упоминалось выше, географическое положение района шельфа, его мелководность и, как следствие, выхолаживание зимой и прогрев летом, сток рек и другие факторы определяют количественные отличия годового хода температуры и солёности на шельфе и в центральной части моря.

Амплитуда внутригодовых колебаний температуры и солёности на поверхности шельфа больше, чем на поверхности центральной части моря (рис.1). С глубиной размах колебаний уменьшается. Также с глубиной происходит запаздывание по времени изменений температуры и солёности.

На поверхности в рассматриваемых районах максимальные средние значения солёности имеют место в феврале, минимальные – в июне, через месяц после максимального стока рек (рис.1, а, б). В осенние месяцы на шельфе, в слое 20 – 40 м, наблюдается уменьшение солёности с минимальным значением в октябре. Оно обусловлено распреснением за счет совместных процессов: осеннего увеличения стока Днепра и Дуная, разрушения

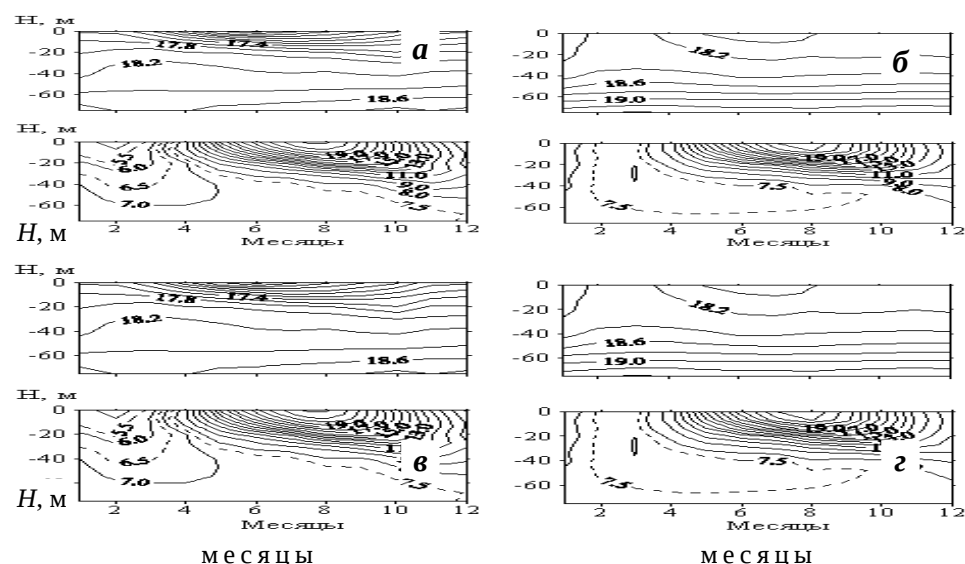
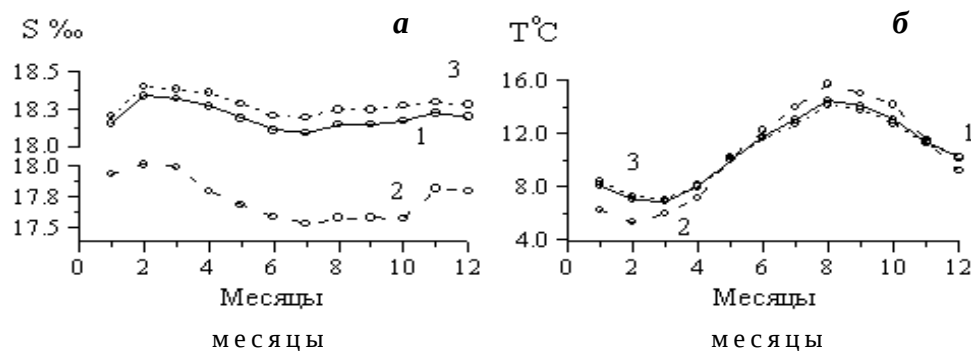


Рис. 1. Диаграммы внутригодовой изменчивости осредненных на стандартных горизонтах значений солёности (а, б) и температуры (в, г) в районе шельфа (а, в) и в центральной части моря, ограниченной изобатой 100



Р и с . 2 . Внутригодовая изменчивость осредненных в слое 0 – 50 м солёности (а) и температуры (б) по всему морю (1), для шельфа (2), для центральной части моря (3).

термоклина в результате осенней термической конвекции, усиления ветра. После разрушения термоклина, повышение солёности в верхнем слое происходит за счет эрозии пикноклина. Максимальные значения солёности на горизонтах 20 – 40 м отмечаются в феврале – марте (рис.1, а, б).

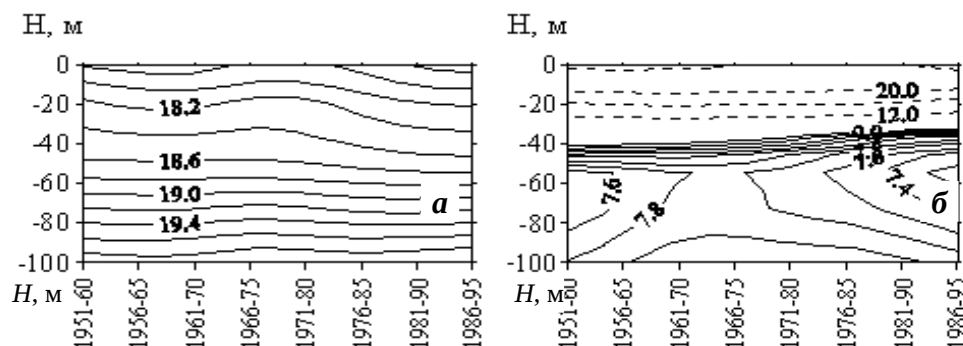
На поверхности максимальные значения температуры на шельфе и в центральной районе отмечаются в августе. Минимальные значения отмечаются на шельфе в феврале; в районе, ограниченном изобатой 100 м, – в марте.

Изменчивость осредненных в слое 0 – 50 м значений солёности на шельфе в основном имеет такой же характер, как и в центральной части моря, с максимумом в феврале, минимумом в июле (рис.2, а). Исключение составляет понижение солёности в октябре, которое обуславливается началом конвективных процессов в водах шельфа (рис.1, а; 2, а). В водах шельфа сезонные изменения средней величины солёности более значительные, чем в центральной части моря. Разница между максимальным значением в феврале и минимальным в июле в центральной части моря составляет 0,2 ‰, на шельфе 0,5 ‰. В результате весеннего стока рек в водах шельфа происходит более глубокое распреснение по сравнению с центральной частью моря, где распресняется только поверхностный слой (рис.1, а, б).

Годовой ход средней в слое 0 – 50 м температуры на шельфе имеет минимум в феврале, в центральной части моря в марте. Более сильное охлаждение шельфовых вод в зимний период времени и прогрев в летний вызывает большую амплитуду колебаний средних значений температуры.

*Междесятилетняя изменчивость по данным августа.* Для оценки многолетней изменчивости температуры и солёности был выбран август, так как в этом месяце проведено наибольшее число гидрологических измерений. Диаграммы изменчивости осредненных по всему морю на стандартных горизонтах солёности и температуры приведены на рис.3.

Для проверки статистической значимости изменчивости средних на горизонтах значений температуры и солёности использовался критерий Фишера [13]. На каждом горизонте проверялась гипотеза о равенстве (различиях) средних значений температуры и солёности, вычисленных для каждого десятилетнего периода. Для этого сравнивались дисперсия, характеризующая рассеяние средних значений внутри всех десятилетних периодов време-



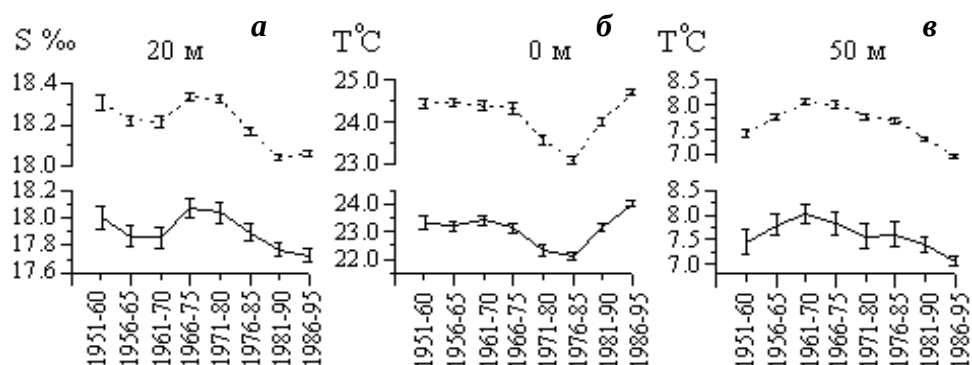
Р и с . 3. Диаграммы междесятилетней изменчивости осредненных по всему морю на стандартных горизонтах по данным августа значений солёности (а) и температуры (б). Интервал между изолиниями: штриховыми 4 °С, непрерывными

ни, и дисперсия, характеризующая рассеяние средних значений между десятилетними периодами.

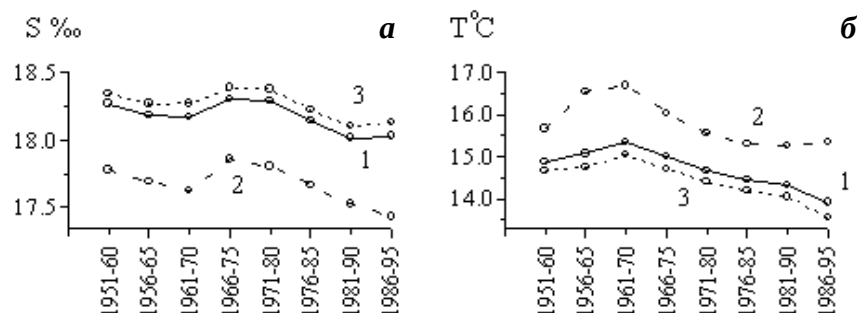
Значимые изменения имеют место и для температуры, и для солёности на всех исследуемых горизонтах в слое 0 – 100 м в центральной части моря, ограниченной изобатой 100 м. На шельфе значимые изменения имеют место для солёности на горизонтах 0 – 60 м, для температуры на горизонтах 0 – 80 м. Наибольшая изменчивость температуры наблюдается на поверхности (0 м) и в слое 40 – 75 м (в области холодного промежуточного слоя), солёности – на горизонтах 10 – 40 м.

На горизонте 20 м на шельфе и в центральной части моря разность между максимальными значениями солёности, имеющими место в 1966 – 1975 гг., и минимальными значениями (на шельфе 1986 – 1995 гг., в центральной части 1981 – 1990 гг.) составляет 0,3 ‰ (рис.4, а). Изменчивость солёности на горизонтах 0 и 50 м для шельфа и центральной части имеет такой же характер, как и на горизонте 20 м.

На поверхности, как в области шельфа, так и центральной части наблюдается минимум температуры в период 1976 – 1985 гг. (рис.4, б). Разница



Р и с . 4. Междесятилетняя изменчивость по данным августа значений солёности на горизонте 20 м (а) и температуры на горизонтах 0 м (б) и 50 м (в) на шельфе (—), в центральной части моря, ограниченной изобатой 100 м (— —



Р и с . 5. Междесятилетия изменчивость осредненных в слое 0 – 50 м по данным августа солёности (а) и температуры (б) по всему морю (1), для шельфа (2), для центральной части моря (3).

между максимальными значениями в период 1986 – 1995 гг. и минимальными в период 1976 – 1985 гг. составляет более 1,5 °C на шельфе и в центральной части моря.

В области холодного промежуточного слоя максимум температуры отмечается в период 1961 – 1970 гг., затем наблюдается понижение температуры (рис.4, в). Разница между максимальными и минимальными значениями составляет 1 °C в обоих районах.

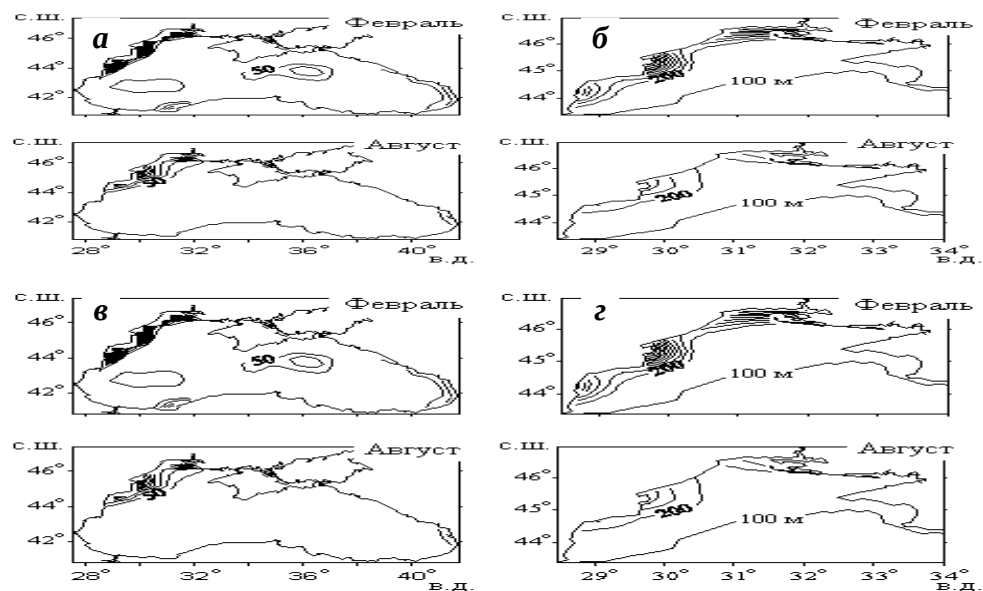
В многолетней изменчивости средних в слое 0 – 50 м значений солёности по данным августа наибольшие значения отмечаются в периоды 1951 – 1960 гг. и 1966 – 1975 гг. (рис.5, а). С периода 1961 – 1970 гг., в котором отмечается локальный максимум, наблюдается тенденция к понижению температуры (рис.5, б). Таким образом, можно отметить наличие колебаний солёносодержания в верхнем 50 м слое и тенденцию к понижению теплосодержания с периода 1961 – 1970 гг.

**Изменчивость ДПЭ.** Данные по температуре и солёности также позволяют оценить изменчивость ДПЭ в верхнем 50-метровом слое моря. В настоящее время отмечается, что значительный вклад в изменчивость полей температуры и солёности вносят синоптические вихревые образования, возникающие в результате неустойчивости Основного черноморского течения за счет уменьшения запаса ДПЭ, а также за счет крупномасштабного горизонтального обмена в прибрежной зоне [5, 14].

В стратифицированной жидкости гравитационная ДПЭ находится в виде запаса энергии в горизонтальных отклонениях поля плотности. Для расчета ДПЭ используется приближенная формула [15]:

$$ДПЭ = -\frac{g}{2} \int \frac{(\rho - \bar{\rho})^2}{\partial \bar{\rho} / \partial z} dV, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – локальная плотность в точке сетки,  $\bar{\rho}$  – средняя плотность на заданном горизонте,  $\partial \bar{\rho} / \partial z$  – градиент потенциальной плотности по вертикали (статическая устойчивость),  $\bar{\rho}$  – осредненная на горизонте потенциальная плотность.



Р и с . 6 . Поля плотности ДПЭ на горизонте 0 м для февраля и августа по всему морю (интервал между изолиниями 50 Дж/м³) (а, в) и на шельфе (интервал между изолиниями 200 Дж/м³) (б, г).

Внутригодовая и междесятилетняя изменчивость ДПЭ рассматривается для осредненных значений плотности ДПЭ в слое 0 – 50 м для каждого района. В качестве средней плотности для расчетов по всем районам принимается средняя по всему морю плотность на заданном горизонте. Средняя на горизонте величина статической устойчивости, стоящая в знаменателе формулы (1), также вычисляется по всему морю.

*Внутригодовая изменчивость.* Максимальные значения осредненной на горизонтах по площади плотности ДПЭ наблюдаются на поверхности и в области пикноклина [1, 9, 10].

На поверхности Черного моря максимальные значения плотности ДПЭ отмечаются на шельфе в районах стока рек. Они более чем на порядок отли-



плотность ДПЭ, Дж/м³      плотность ДПЭ, Дж/м³      статическая устойчивость,  $\times 10^{-5}$  кг/м⁴

Р и с . 7 . Профили осредненной на горизонтах плотности ДПЭ для февраля (а) и августа (б) во всем море (1), на шельфе (2), в центральной части моря (3) и осредненной на горизонтах по всему морю статической устойчивости (в).



Рис. 8. Внутригодовая (а) и междесятилетняя по данным августа (б) изменчивость осредненной в слое 0 – 50 м плотности ДПЭ по всему морю (1), для шельфа (2), для центральной части моря (3).

чаются от значений плотности ДПЭ на поверхности в глубоководных районах моря (рис.6).

С июля по сентябрь наблюдается локальный максимум средней плотности ДПЭ в центральной части моря на горизонте 20 м (рис.7). Он связан с более высоким климатическим положением термоклина (на 5 – 7 м) в восточной части моря в этот период [1].

Средние значения плотности ДПЭ в слое 0 – 50 м на шельфе более чем в два раза превышают значения в центральной части моря (рис.8). На шельфе изменчивость ДПЭ в основном определяется горизонтальными отклонениями поля плотности, возникающими за счет стока рек. Максимальные величины горизонтальных отклонений от среднего по морю значения плотности наблюдаются в апреле – июне, минимальные в январе – феврале. В период существования термоклина эти величины компенсируются высокими значениями статической устойчивости. Внутригодовая изменчивость средней в слое 0 – 50 м статической устойчивости имеет форму синусоиды с минимумом в феврале ( $790 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^4$ ) и максимумом в августе ( $8000 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^4$ ). Поэтому в летние месяцы отмечается понижение ДПЭ. Максимальные значения ДПЭ на шельфе имеют место в марте – апреле и октябре – декабре (рис.8, а).

В центральной части моря максимальное среднее значение горизонтальных отклонений поля плотности отмечается в сентябре, а высокие значения плотности ДПЭ имеют место с декабря по март, в период низких значений статической устойчивости (рис.8, а).

*Междесятилетняя изменчивость по данным августа.* Август, как и все летние месяцы, характеризуется низкими по сравнению с другими сезонами значениями плотности ДПЭ. Результаты расчетов плотности ДПЭ, осредненной в слое 0 – 50 м по десятилетним данным за август, приведены на рис.8, а. Высокие значения ДПЭ на шельфе отмечаются в 1951 – 1970 гг. и 1976 – 1985 гг., в центральной части в 1956 – 1970 гг. и 1976 – 1985 гг. (рис.8, б). В 1976 – 1985 гг. отмечается минимальное среднее по всему морю в слое 0 – 50 м значение статической устойчивости.

Минимальные значения плотности ДПЭ на шельфе отмечаются в 1966 –



1975 гг., в центральной части в 1951 – 1960 гг. и 1966 – 1980 гг., что совпадает с периодами, в которые отмечаются высокие значения солёности (рис.5, а).

Сравнивая полученные результаты для слоя 0 – 50 м с результатами расчетов, проведенными ранее для слоев 50 – 150 и 150 – 300 м по данным августа [10], необходимо отметить, что тенденции изменчивости ДПЭ и статической устойчивости в разных слоях отличаются друг от друга. Как показано в [10], ДПЭ во всем слое 50 – 300 м имеет максимум в период 1961 – 1970 гг., затем значительно уменьшается (более чем в 2 раза) к периоду 1976 – 1985 гг. и затем снова увеличивается. Статическая устойчивость увеличивается в слое 50 – 150 м и уменьшается в слое 150 – 300 м с периода 1966 – 1975 гг.

**Выводы.** Оценена изменчивость температуры, солёности и ДПЭ вод северо-западного шельфа и центральной части моря, ограниченной изобатой 100 м, на внутригодовом интервале по климатическим данным за каждый месяц и на 45-летнем интервале по данным за десятилетние периоды времени с пятилетним сдвигом.

Внутригодовые и многолетние колебания температуры и солёности на шельфе имеют большую амплитуду по сравнению с центральным районом. С глубиной разница между амплитудой колебаний на шельфе и в центральной части моря уменьшается как на сезонных, так и на многолетних временных масштабах.

Исследование междесятилетней изменчивости температуры и солёности по данным августа показало наличие статистически значимых изменений. Наибольшая изменчивость температуры наблюдается на поверхности (0 м) и в слое 40 – 75 м (в области холодного промежуточного слоя), солёности – на горизонтах 10 – 40 м. Несмотря на то, что шельф в большей степени подвергается влиянию внешних факторов (атмосферного воздействия, речного стока и т.п.) тенденции изменений на горизонтах на многолетнем временном интервале имеют одинаковый характер, как для вод шельфа, так и для вод центральной части моря.

Средние значения плотности ДПЭ в слое 0 – 50 м на шельфе более чем в два раза превышают значения в центральной части моря.

#### Список литературы

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.4. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И.Симонова и Э.И.Альтмана.*– Л.: Гидрометеиздат, 1991.– 430 с.
2. *Косарев А.Н., Архипкин В.С., Катыхиева М.В.* Гидрологическая структура вод северо-западной части Черного моря // Вестник Московского университета.– 2001.– 5.– С.50-55.
3. *Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга Е.Е.* Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2001.– 5 (IX-X).– С.41-55.
4. *Суворов А.М., Андрющенко Е.Г., Годин Е.А., Ингеров А.В., Касьяненко Т.Е., Платун Т.В., Халиулин А.Х.* Банк океанологических данных МГИ НАНУ. Содержание и структура баз данных, система управления базами данных // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003.– С.130-137.

5. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– Л.: Гидрометеиздат, 1984.– 239 с.
6. *Белокопытов В.Н.* Сезонная изменчивость термохалинной и гидрологической структуры вод Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003ю– С.12-22.
7. *Полонский А.Б.* Изменчивость гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря, вызванная крупномасштабными процессами // Метеорология и гидрология.– 1997.– 3.– С.59-70.
8. *Белевич Р.Р., Орлова И.Г.* Особенности межгодовой изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод на северо-западном шельфе Черного моря в последние десятилетия (60-90-е гг.) // Морской гидрофизический журнал.– 1996.– 2 (III-IV).– С.72-73.
9. *Голубев Ю.Н., Тужилкин В.С.* Некоторые аспекты синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря. Препринт.– Севастополь: МГИ АН СССР, 1990.– 72 с.
10. *Суворов А.М., Шокурова И.Г.* Годовая и междесятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // Морской гидрофизический журнал. (в печати)
11. *Беляев В.И.* Обработка и теоретический анализ океанологических наблюдений.– Киев: Наукова думка, 1973.– 295 с.
12. *Объективный анализ метеорологических полей.*– Л.: Гидрометеиздат, 1963.– 287 с.
13. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике.– М.: Наука, 1978.– 831 с.
14. *Кортаев Г.К., Никифоров А.А.* Трансфронтальный перенос синоптическими вихрями в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001.– С.40-52.
15. *Oort A.H., Asher S.C., Levitus S., Peixoto J.P.* New estimates of the available potential energy in the world ocean // J. Geophys. Res.– 1989.– 94.– P.3187-3200.

Материал поступил в редакцию 22.03.2004 г.  
После доработки 08.04.2004 г.