

ОЦЕНКИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДОСТУПНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ЧЕРНОМ МОРЕ

А.М. Суворов, И.Г. Шокурова

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

Оценивается многолетняя изменчивость доступной потенциальной энергии крупномасштабных процессов в Черном море в слое 0-300 метров на основе данных по температуре и солености за десятилетние периоды с пятилетним сдвигом с 1956 по 1995 год для марта и августа. Максимальные значения доступной потенциальной энергии, как в марте, так и в августе отмечаются в период 1961-1970, минимальные - в марте в период 1981-1990 гг., в августе в период 1976-1985 гг.

Введение. В связи с возрастающим антропогенным влиянием на морскую среду и отмечаемыми в настоящее время глобальными изменениями в климате Земли [1] представляет интерес исследование многолетней изменчивости гидрофизических полей Черного моря. Черное море имеет небольшие размеры и ограниченный водообмен с другими морями, поэтому изменчивость воздействия внешних факторов может иметь более значимый отклик, чем в океане [2].

В настоящей работе на основе данных по температуре и солености марта и августа оценивается междесятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии крупномасштабных процессов в Черном море в слое 0-300 (0-500 для августа) метров.

Доступная потенциальная энергия (ДПЭ) определяется как разность между суммой внутренней и потенциальной энергий в данный момент времени и наименьшим значением этой величины, которое достигается в состоянии с устойчивой стратификацией плотности, горизонтальными изэнтропическими поверхностями и постоянным давлением на каждой из этих поверхностей [3,4]. Она представляет собой ту часть потенциальной энергии, которая является доступной для превращения в кинетическую

энергию. Обычно принято оценивать доступную гравитационную потенциальную энергию, как доминирующую составляющую по сравнению с доступной внутренней потенциальной энергией [5]. В стратифицированной жидкости доступная гравитационная потенциальная энергия находится в виде запаса энергии в горизонтальных отклонениях поля плотности. Структура изопикнических поверхностей в слое постоянного пикноклина в Черном море в течение всего года имеет куполообразное строение. Это связано с циклоническим характером циркуляции, подъемом вод в центральной части моря и опусканием вблизи шельфовых склонов. Поэтому максимальные значения ДПЭ достигаются в центральной части моря и вдоль береговых склонов [6,7].

Исследования внутригодовой изменчивости ДПЭ по климатическим данным показали наличие сезонного цикла [7,8,9]. В осенне-зимний период происходит увеличение плотности доступной потенциальной энергии в слое 0-50 метров с максимумом в декабре-январе ($30 \text{ Дж}/\text{м}^3$). С января плотность доступной потенциальной энергии увеличивается в слое главного пикноклина, 50-150 метров, с максимумом в марте ($50 \text{ Дж}/\text{м}^3$), затем к августу уменьшается ($14 \text{ Дж}/\text{м}^3$) [7].

Изменчивость величины ДПЭ отражает изменчивость поля плотности (изменения степени кривизны куполообразных изопикнических поверхностей) и, таким образом, может служить косвенным показателем изменчивости крупномасштабной циркуляции в Черном море.

Описание данных и методов. Для расчетов использовались выборки из массива гидрологических данных банка данных МГИ НАН Украины с 1956 по 1995 год: 6300 станций, выполненных в марте, и 11500 станций - в августе.

Использовались данные за десятилетние периоды с пятилетним сдвигом с 1956 по 1995 год. Периоды и их продолжительность были выбраны так, чтобы станции равномерно заполняли акваторию моря. Март был выбран как месяц, в котором достигается межсезонный максимум ДПЭ [7] и он, по сравнению с февралем и апрелем, более обеспечен данными в 50-60 годы. Август является месяцем, наиболее обеспеченным данными по времени, по акватории и по глубине [7].

Для увеличения обеспеченности данными на стандартных горизонтах проводилась вертикальная интерполяция с горизонтов наблюдений на стандартные горизонты. Поля температуры и солености на стандартных горизонтах рассчитывались методом оптимальной интерполяции для каждого месяца [10,11]. Значения вычисляются в узлах сетки с шагом - 5' по широте и 8.57' по долготе (5×5 миль).

На основе полученных полей температуры и солености ДПЭ рассчитывалась по приближенной формуле [5]:

$$ДПЭ = -\frac{1}{2} g \int \frac{(\rho - \tilde{\rho})^2}{\partial \tilde{\rho}_0 / \partial z} dV,$$

где g – гравитационное ускорение, ρ – локальная плотность в точке сетки, $\tilde{\rho}$ – средняя плотность на заданном горизонте, $\partial \tilde{\rho}_0 / \partial z$ – градиент потенциальной плотности по вертикали (статическая устойчивость), $\tilde{\rho}_0$ – осредненная на горизонте потенциальная плотность. Для расчета плотности использовалась формула [12], потенциальной температуры и потенциальной плотности – [4].

Для удаления мелко и мезомасштабных неоднородностей полученные поля температуры и солености сглаживались [7].

Расчеты проводились для следующих горизонтов: 0, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 100, 120, 130, 140, 150, 200, 250, 300 и дополнительно 400 и 500 метров для августа.

Междестилетняя изменчивость. Для исследования междестилетней изменчивости вычислялись средние на горизонтах значения плотности ДПЭ и средние значения плотности ДПЭ в слоях 0-300, 50-300, 0-50, 50-100, 50-150 метров и 150-300 метров (до 500 метров для августа).

Осредненные по расчетам за все периоды профили плотности ДПЭ ($\text{Дж}/\text{м}^3$) и статической устойчивости ($\text{кг}/\text{м}^4$) приведены на рис.1.

Наибольшие значения ДПЭ в течение всего года наблюдаются на поверхности и в области пикноклина (постоянного галоклина) [7]. В марте и в августе по климатическим данным максимальные значения в области пикноклина отмечаются на горизонте 100 метров. Максимальное значение статической устойчивости в марте достигается в

области пикноклина, на горизонтах 70-90 метров, а в августе – в области термоклина, на горизонтах 15-20 метров (рис.1б).

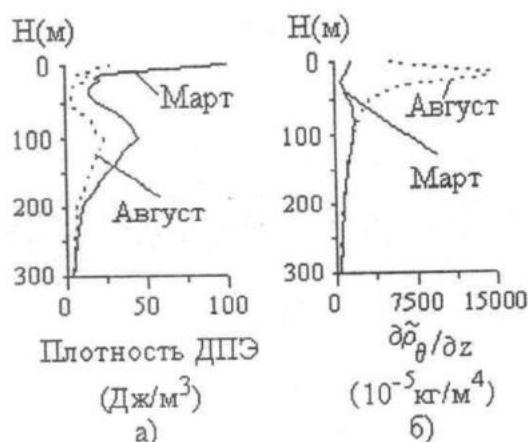


Рис. 1 – Распределение средней плотности ДПЭ ($\text{Дж}/\text{м}^3$) (а) и статической устойчивости ($\text{кг}/\text{м}^4$) (б) в марте и августе.

Изменчивость на горизонтах. По результатам расчетов для всех исследуемых десятилетних периодов в слое постоянного галоклина максимальные значения плотности ДПЭ, как в марте, так и в августе, находятся на горизонте 100 метров (рис.1а). Исключение составляют периоды для марта: период 1966-1975 гг., когда максимальное значение средних на горизонтах величин плотности ДПЭ было получено на горизонте 150 метров, и период 1986-1995 гг., с максимумом на горизонте 90 метров.

По расчетам для марта в области пикноклина на горизонтах выше и ниже 100-120 метров изменчивость плотности ДПЭ имеет различные тенденции. Выше 100-120 метров плотность ДПЭ увеличивается, начиная с периода 1966-1971 гг., а ниже – уменьшается (рис.2) [6]. На горизонте 75 метров плотность ДПЭ увеличилась более чем в 1.5 раза (рис. 2.а). В период 1966-1975 гг., как отмечалось выше, высокие средние значения плотности ДПЭ достигались ниже горизонта 100 метров с максимумом на горизонте 150 метров.

Для августа на всех горизонтах в слое пикноклина изменчивость имеет одинаковый характер с максимумом в период 1961-1970 гг. и минимумом в период 1976-1985 гг. (рис. 2.б). Для горизонтов 200 метров и ниже значения плотности ДПЭ в последние четыре десятилетия периода ниже, чем в первые три периода, более чем в полтора раза.

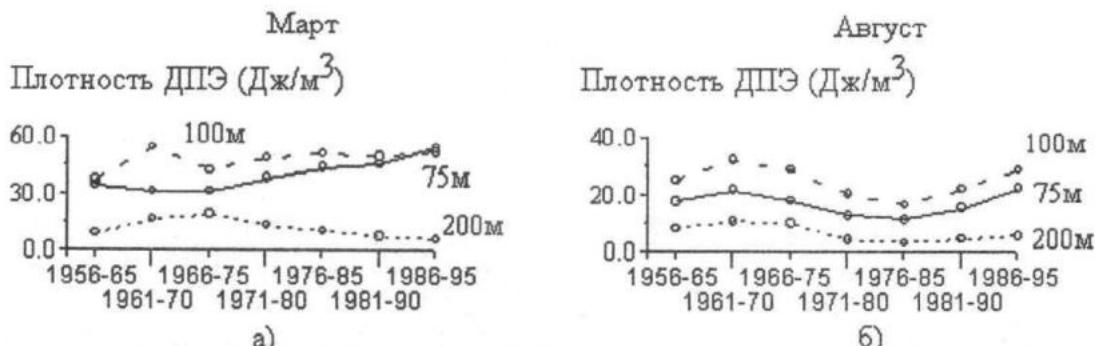


Рис. 2 – Средние на горизонтах значения плотности ДПЭ (Дж/m³) для марта (а) и августа (б).

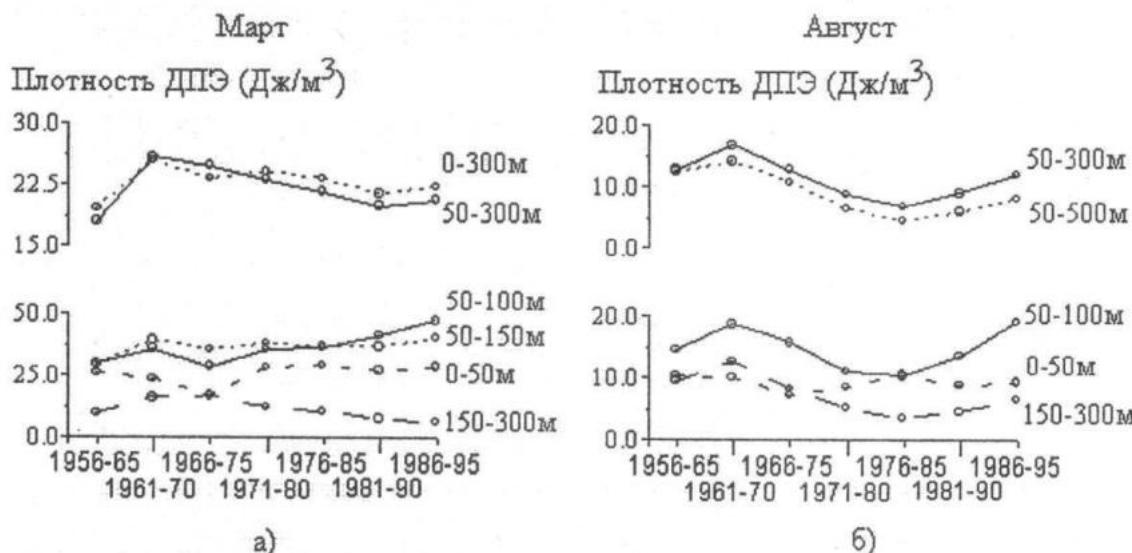


Рис. 3 – Средние значения плотности ДПЭ (Дж/m³) в слоях для марта (а) и августа (б).

Изменчивость в слоях. Для марта имеет место тенденция к увеличению средней плотности ДПЭ в верхней части постоянного галоклина, слое 50-100 метров начиная с периода 1966-1975 гг. (рис.3а). В слое 150-300 метров средние значения плотности ДПЭ имеют максимум в период 1966-1975 гг., затем уменьшаются к периоду 1986-1995 гг. более чем в два раза. Максимальное значение средней плотности ДПЭ в слое 50-300 (0-300) метров наблюдалось в период 1961-1970 гг. минимальное в период 1981-1990 гг.

Для августа средняя плотность ДПЭ во всех рассматриваемых слоях (рис.3б) (кроме слоя 0-50 метров) имеет максимум в период 1961-1970 гг., затем наблюдается уменьшение плотности, минимум достигается в период 1976-1985 гг., а затем снова происходит увеличение. После периода 1961-1970 гг. средняя плотность ДПЭ в

слоях 50-300 (50-500) метров и 150-300 (150-500) метров уменьшилась (рис.3б). Характер изменчивости в слоях 0-300 и 0-500 метров такой же, как и в слоях 50-300, 50-500 метров. Величина плотности ДПЭ в слое 50-300 метров уменьшается от периода 1961-1970 гг. к периоду 1976-1985 гг. более чем в 2 раза.

В слое 0-50 метров минимальное значение ДПЭ и в марте и в августе имеет место в период 1966-1975 гг., максимальное - в период 1976-1985.

Графики изменчивости статической устойчивости для марта и августа приведены на рисунке 4. В периоды 1976-1985 гг., 1981-1990 гг. наблюдаются более высокие по сравнению с другими периодами значения статической устойчивости в слое 50-300 метров с максимумом в период с 1981 по 1990 год (рис.4а,4б).

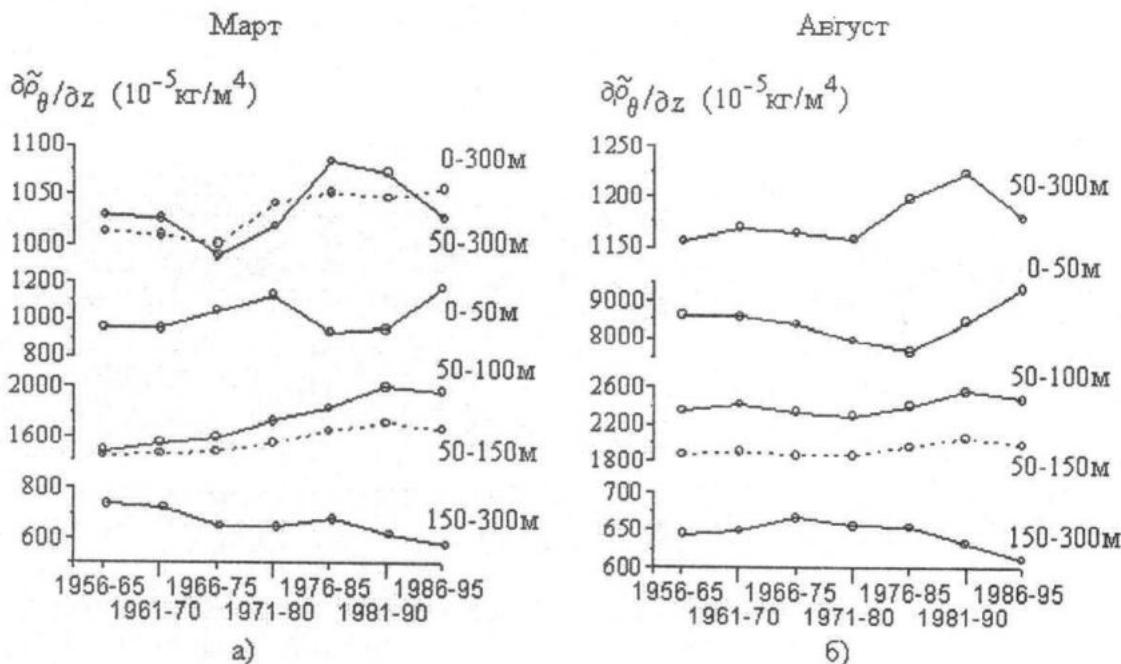


Рис. 4 – Средние значения статической устойчивости ($10^{-5} \text{ кг}/\text{м}^4$) в слоях для марта (а) и августа (б).

Для марта наблюдается увеличение статической устойчивости в верхнем слое постоянного галоклина - 50-100 метров и уменьшение в слое 150-300 метров (рис.4а). В августе в слое 150-300 метров уменьшение статической устойчивости происходит с периода 1966-1975 гг. (рис.4б).

В первые четыре периода, с 1956 по 1975 год, данные марта по температуре и солености недостаточно равномерно распределены по акватории моря. Поэтому расчеты для этих периодов проводились как по исходным данным, так и с добавлением климатического фона по редкой сетке 40×40 миль. Результаты расчетов, проведенные с добавлением климатического фона, не имеют существенных отличий от результатов расчетов, проведенных без добавления фона. Также не изменились тенденции изменчивости ДПЭ при увеличении или уменьшении степени сглаживания полей температуры и солености.

Для проверки статистической значимости изменчивости ДПЭ использовался критерий Фишера [13]. На каждом горизонте проверялась гипотеза о равенстве средних значений плотности ДПЭ, вычисленных для каждого десятилетнего периода. Для этого сравнивались дисперсия, характеризующая рассеяние значений плотности ДПЭ внутри всех десятилетних периодов времени, и дисперсия, характеризующая рассеяние средних значений плотности ДПЭ между

десятилетними периодами. Максимальная изменчивость ДПЭ наблюдается для марта на горизонтах 20-80 и 150-200 метров, для августа на горизонтах 40-130, 200-500 метров.

Заключение. В исследуемый период 1956-1995 гг. наблюдаются статистически значимые изменения плотности ДПЭ. По расчетам для марта отмечаются различные тенденции изменчивости ДПЭ и статической устойчивости в верхнем слое пикноклина 50-100 (150) метров и в слое 150-300 метров. В слое 50-100 (150) метров ДПЭ и статическая устойчивость увеличиваются, в слое 150-300 метров уменьшаются. Для августа величина ДПЭ в слое 50-300 метров уменьшается от периода 1961-1970 гг. к периоду 1976-1985 гг. более чем в 2 раза.

Общими чертами изменчивости для марта и августа являются: наличие максимума средней плотности ДПЭ в слое 50-300 метров в период 1961-1970 гг., уменьшение средней плотности ДПЭ в слое 150-300 метров после периода 1961-1970 гг., увеличение статической устойчивости в слое 50-300 метров в последние три периода 1976-1995 гг.

Различия в характере изменчивости величин плотности ДПЭ в области постоянного галоклина для марта и августа могут объясняться различной динамической ситуацией в эти месяцы. В Черном море в зимний период отмечается интенсификация

циклонической циркуляции и ослабление летом [14,15]. В марте-апреле изпикнические поверхности максимально приподняты в центральных районах моря и заглублены на перифериях. В это время отмечается максимум запаса ДПЭ, который к августу уменьшается. Накопленная ДПЭ трансформируется в кинетическую энергию основного геострофического потока и энергию вихревых синоптических образований [8].

Учитывая характер сезонного хода изменчивости ДПЭ [7] можно сделать предположение, что величина запаса ДПЭ в августе в основном зависит от величины запаса ДПЭ в зимний и весенний периоды.

В периоды 1976-1985 гг. для марта и 1981-1990 гг. для августа наблюдаются более высокие по сравнению с другими периодами значения статической устойчивости в слое 50-300 метров. Увеличение статической устойчивости в слое 50-100 метров и уменьшение в слое 150-300 метров свидетельствует об усилении стратификации и уменьшении толщины бароклинного слоя – основного пикноклина. Это также говорит и об ослаблении вертикального перемешивания в море.

Исходя из схемы механического бюджета в море [7,16], причинами, вызвавшими изменение запаса ДПЭ, могут быть: изменчивость поля скорости ветра над Черным морем в зимний период [14], ослабление или усиление конвекции в результате межгодовых колебаний температуры воздуха в зимний период, а также изменения в солевом бюджете, за счет колебаний стока рек и водообмена через Босфор.

Полное исследование причин изменчивости запаса ДПЭ требует исследования изменчивости всех внешних факторов, оказывающих влияние на термохалинную структуру Черного моря во все сезоны года.

ЛИТЕРАТУРА

1. CLIVAR (A study of climate variability and predictability), Science Plan. // WCRP-89, WMO/TD, – 1995. № 690. – 272 с.
2. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
3. Вулис И.Л., Монин А.С. О доступной потенциальной энергии океана. // Докл. АН СССР, – 1975. – 221, № 3. – С. 597-600.
4. Гилл А., Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т.1. – 397 с., т. 2. – 415 с.
5. Oort, A.H., S.C.Asher, S Levitus et al. New estimates of the available potential energy in the world ocean // J.Geophys. Res. – 1989. – 94, № C3. – Р. 3187-3200.
6. Суворов А.М., Островская И.Г. Изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // Системы контроля окружающей среды: – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. – С. 185-190.
7. Суворов А.М., Шокурова И.Г. Годовая и междесятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // Морской гидрофизический журнал, – 2004. – № 2. – С. 29-41.
8. Еремеев В.Н., Иванов В.А., Тужилкин В.С. Климатические черты внутригодовой изменчивости гидрофизических полей шельфовой зоны Черного моря. – Севастополь, – 1991. – 52 с. – (Препринт / НАН Украины. МГИ).
9. 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.
10. Беляев В.И. Обработка и теоретический анализ океанологических наблюдений, – Киев: Наук. думка, 1973. – 295 с.
11. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 287 с.
12. Обработка данных океанографической станции – Севастополь: ЮНЕСКО – МГИ НАН Украины, 1993. – 136 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике – М: Наука, 1978. – 831 с.
14. Коротаев Г.К. О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал, – 2001. – № 6. – С. 14-20.
15. Демышев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // Морской гидрофизический журнал, – 2002. – № 3. – С. 12-27.
16. Toggweiler J.R. and B. Samuels. On the ocean's large-scale circulation near the limit of no vertical mixing // J. Phys.Oceanogr., – 1998, – 28, № 9. – Р. 1832-1852.