

# *Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана*

УДК 561.465.(262.5)

А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова

## **Изменения сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море**

На основе обработки архивных гидрологических данных анализируется сезонный ход геострофической циркуляции в Черном море и его долговременная изменчивость. Показано, что изменчивость течений декадных (десятилетних) временных масштабов, по-разному проявляющаяся в различные сезоны, приводит к изменениям в характеристиках сезонного хода геострофической циркуляции во второй половине XX в. Усиление зимней циркуляции и ослабление летней с середины 1970-х гг. приводит к увеличению амплитуды годового хода скорости течений на поверхности моря. Обсуждаются вероятные причины изменчивости интенсивности геострофических течений в Черном море.

### **Введение**

Проведенные в последнее время исследования циркуляции в Черном море, осредненной за различные промежутки времени, выявили наличие долговременной изменчивости. Так, расчеты, выполненные с использованием ассимиляции климатических гидрологических полей, восстановленных по массиву данных за 1903 – 2003 гг., показали интенсификацию Основного Черноморского течения (ОЧТ), особенно в зимний период, по сравнению с ОЧТ, восстановленным с использованием массива данных за более короткий период 1903 – 1982 гг. [1, 2]. В [3] по результатам анализа декадной изменчивости с использованием данных за зимний сезон 1960 – 1990 гг. выявлена тенденция к усилению геострофической циркуляции в поверхностном слое моря и ослаблению – в нижней части пикноклина (здесь и далее под декадными понимаются десятилетние масштабы). В [4] на основе обработки данных по температуре и солености на черноморских «вековых» разрезах делается вывод об интенсификации циркуляции вод в области западного циклонического круговорота в конце зимнего сезона 1960 – 1970 гг.

В связи с выявленными изменениями возникает вопрос об относительной изменчивости циркуляции в Черном море в различные сезоны на длительных (~ 50 лет) временных масштабах и связанных с этим изменениях количественных характеристик сезонного хода.

Характер сезонного хода циркуляции в Черном море неоднозначно представлялся в разные периоды исследований. В результате анализа данных за

© А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, 2010

период 1920-е – начало 1960-х гг. (~ 10000 станций) был сделан вывод, что интенсификация геострофической циркуляции происходит зимой, а к лету она ослабевает [5]. В работе [6] на основе вычислений, выполненных динамическим методом с использованием данных, включающих наблюдения по 1973 г. (~ 20000 станций), получено, что наряду с зимней интенсификацией усиление течений происходит также летом, а весной и осенью циркуляция ослабевает. В расчетах, выполненных на основе массива данных, содержащих наблюдения по 1982 г. (~ 53500 станций) [7], делается вывод, аналогичный [5]. Вычисления по современному массиву данных (~ 150000 станций) показывают, что циркуляция усиливается в зимне-весенний период и ослабевает летом [8 – 10]. Расхождения в оценках могут объясняться двумя причинами – недостатком данных при расчетах в ранние периоды исследований или наличием изменчивости на длительных временных масштабах, по-разному проявляющейся в разные сезоны.

Цель настоящей работы – исследование изменений сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море на основе обработки архивных данных гидрологических измерений. Рассматривается осредненный сезонный ход циркуляции в море и его количественные характеристики. Анализируется междекадная изменчивость течений в летний сезон 1951 – 1995 гг. по сравнению с ходом изменчивости в зимний сезон, полученным в работе [3]. Проводится сравнение сезонного хода кинетической энергии (КЭ) геострофической циркуляции двух 25-летних периодов – с 1951 по 1975 и с 1976 по 2000 г.

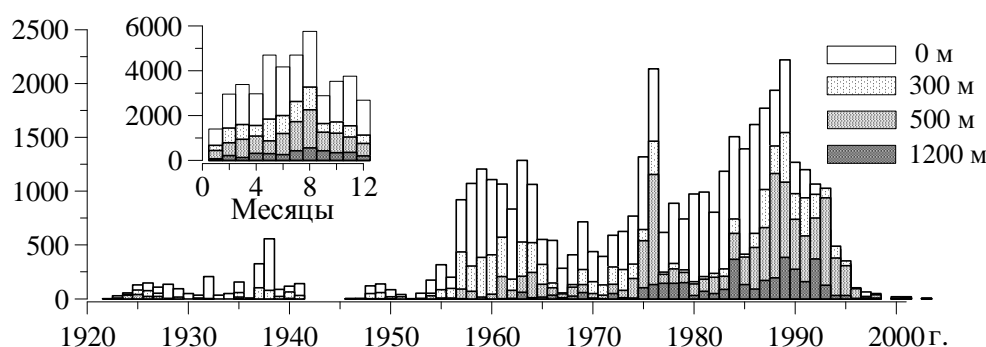
### **Данные и методика их обработки**

В работе использовался современный массив гидрологических измерений температуры и солености в Черном море банка данных МГИ НАН Украины [11]. Для оценки сезонного хода геострофической циркуляции применялись данные за весь период наблюдений. Накопленного к настоящему времени количества данных наблюдений в море достаточно для анализа осредненного сезонного хода. Однако при исследовании долговременной изменчивости течений к данным предъявляются дополнительные требования – наличие длительного ряда наблюдений и регулярность их выполнения по времени и акватории. Несмотря на то, что гидрологические измерения в Черном море выполняются с конца XIX в., относительно регулярные измерения, позволяющие проводить исследования пространственно-временной изменчивости течений, начались с середины прошлого столетия (рис. 1). Этот период (1950 – 1990 гг.) используется для анализа долговременной изменчивости. Наименьшее число данных приходится на январь, наибольшее – на август (рис. 1). С увеличением глубины горизонта количество измерений убывает. В 50-е – начале 70-х гг. данных измерений значительно меньше по сравнению с последующими годами и они неравномерно распределены по пространству. Недостаток данных не позволяет проводить исследования долговременной изменчивости на межгодовых временных масштабах, поэтому использовались данные декадных масштабов. Междекадная изменчивость среднемесячной циркуляции вычислялась по гидрологическим измерениям за август 1951 – 1995 гг., осредненным за десятилетние периоды с пятилетним сдви-

гом. Для определения изменчивости сезонного хода расчеты проводились по измерениям, осредненным за 1951 – 1975 и 1976 – 2000 гг.

По данным температуры и солёности, прошедшим статистический контроль качества, вычислялась плотность [12]. Восстановление поля плотности на регулярную пятимильную сетку ( $\sim 9,3 \times 9,3$  км) осуществлялось методом оптимальной интерполяции, который, по сравнению с другими методами, даёт более точные результаты, особенно при редкой сети станций [13]. При восстановлении климатических полей плотности в качестве нормы (поля первого приближения) использовалось ее среднее по полю значение. Расчеты выполнялись для горизонтов 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 600, 800, 1000 и 1200 м. При интерполяции по декадным данным и за отдельные временные периоды в качестве нормы использовались климатические поля плотности для соответствующих месяцев. Для устранения мелко- и мезомасштабных неоднородностей поля сглаживались пространственным параболическим фильтром с радиусом 25 миль.

#### Количество станций



**Р и с. 1.** Распределение количества станций на горизонтах 0, 300, 500 и 1200 м в глубоководной части Черного моря по годам и месяцам

Скорости течений рассчитывались динамическим методом, который позволяет вычислять геострофическую компоненту полной скорости течений. При анализе долговременной изменчивости геострофической циркуляции его использование, кроме простоты, имеет, по крайней мере, еще один «плюс» по сравнению с диагностическими расчетами по полной модели – не требуется задания граничных условий. Учет на границах неточных данных по многолетней изменчивости потоков тепла и импульса может приводить к дополнительным погрешностям при расчете циркуляционных особенностей, так как данные различных реанализов по потокам тепла, ветру, осадкам и т. д. существенно различаются между собой в периоды, не обеспеченные спутниковыми наблюдениями.

Количество и распределение гидрологических измерений позволяют проводить расчеты осредненного сезонного хода геострофической циркуляции от глубоких горизонтов, по крайней мере от поверхности 1200 дбар ( $\sim 1200$  м) (рис. 1). Но при исследовании временной изменчивости циркуля-

ции глубина отсчетной поверхности ограничивается 300 дбар вследствие недостаточного количества данных на более низких горизонтах. Кроме этого, при выборе глубины нулевой поверхности также учитывались следующие обстоятельства.

– Как показывают современные исследования, структура крупномасштабной циркуляции в Черном море принципиально не изменяется с глубиной [14]. Основной бароклинный слой моря с высокими горизонтальными и вертикальными градиентами плотности располагается на глубине 50 – 300 м. Ниже 300 м градиенты плотности незначительны и скорости быстро убывают. На более глубоких горизонтах (750 и 1500 м) скорости составляют не более 5 – 10% от скоростей в поверхностном слое [14].

– Воздействие внешних факторов, действующих на поверхности моря и оказывающих основное влияние на изменчивость циркуляции вод, главным образом ограничивается верхним слоем 0 – 300 м.

– Расчеты от поверхности 300 дбар традиционно используются для количественных оценок поверхностных геострофических течений в Черном море, что дает возможность проводить сравнение с более ранними публикациями.

Не ограничиваясь этими соображениями, мы провели сопоставление ежемесячных климатических полей динамической топографии поверхности моря, вычисленных от поверхностей 300, 500 и 1200 дбар. Получено, что при увеличении глубины поверхности отсчета структура полей изменяется незначительно, что отражает отмеченное выше сохранение характера вращения вод. Таким образом, расчеты относительно 300 дбар отображают основные элементы крупномасштабной структуры циркуляции в Черном море и позволяют достаточно надежно оценивать изменчивость геострофических течений в верхнем слое. Естественно, при изменении глубины отсчетной поверхности изменяются и величины вычисленных геострофических скоростей. При расчетах от 1200 дбар скорости на поверхности моря выше, чем при расчетах от 300 и 500 дбар, в среднем на 15 и 10% летом и 25 и 15% зимой. Таким образом, при расчетах от поверхностей 300 и 500 дбар можно делать соответствующую поправку величин скоростей.

Кинетическая энергия течений для единичного объема рассчитывалась по формуле  $KЭ = \rho_{p,t,s} V^2/2$  (Дж/м<sup>3</sup>), где  $\rho_{p,t,s}$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность морской воды,  $V$  (м/с) – скорость течения.

Завихренность касательного напряжения ветра на поверхности моря  $\text{rot } \tau_w$  вычислялась по данным о скорости ветра реанализа *NCEP/NCAR* (с пространственным разрешением  $1,905 \times 1,875^\circ$ ) [15]. Для расчета касательного напряжения трения ветра использовалась аэродинамическая формула  $\tau_w = \rho_a C_d U^2$  (Н/м<sup>2</sup>), где  $\rho_a$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность воздуха,  $C_d$  (безразмерная величина) – коэффициент сопротивления морской поверхности,  $U$  (м/с) – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря. Расчет коэффициента  $C_d$  проводился по эмпирическим формулам из [16, 17].

## Результаты, их анализ и обсуждение

Осредненный сезонный ход. Основные черты крупномасштабной структуры циркуляции вод в Черном море хорошо известны. Она включает в себя следующие элементы:

– ОЧТ – циклонический кольцевой вдольбереговой поток, направленный вдоль кромки шельфа [5, 6];

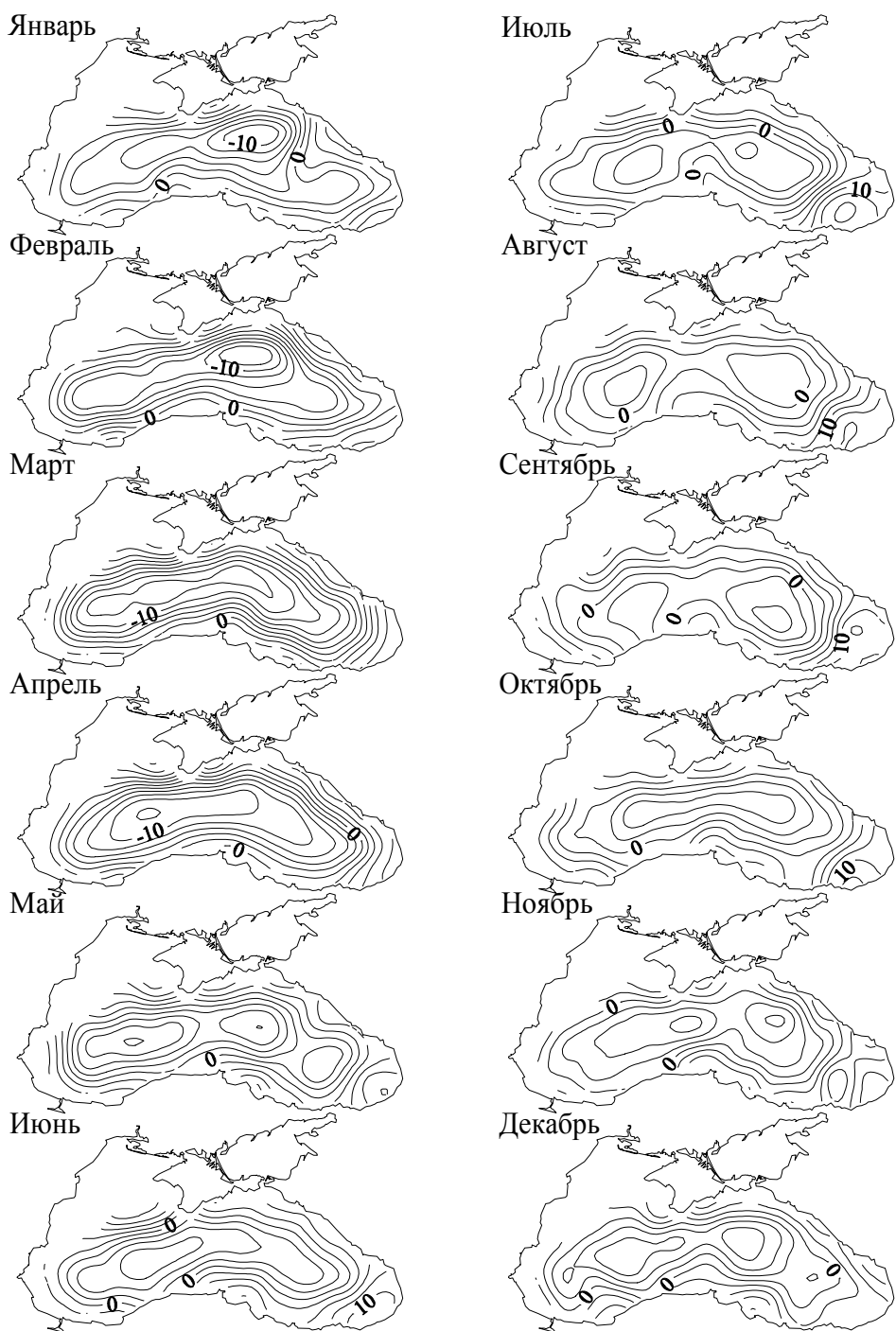
– два крупномасштабных циклонических круговорота в восточной и западной частях моря, положение, размеры и интенсивность которых претерпевают заметные изменения в течение года [5, 6, 9, 10];

– квазистационарные антициклонические вихри, такие, как Батумский, Севастопольский и другие, в прибрежной зоне, справа от основного потока, и циклонические вихри во внутренней части бассейна [18 – 20].

На рис. 2 приведены вычисленные относительно поверхности 500 дбар среднесезонные поля динамической топографии поверхности глубоководной части моря. Максимальная интенсификация циркуляции достигается в марте. В марте – апреле ОЧТ представляет собой единый круговорот, охватывающий все море вдоль материкового склона. На поверхности по всему потоку ОЧТ отмечаются скорости  $\sim 0,14 - 0,16$  м/с, максимальные до 0,20 м/с – к западу от Крыма, в районе свала глубин северо-западного шельфа (величины скоростей получены вычислением от поверхности 500 дбар). В апреле центр круговорота смещается в западную часть моря. Перепад динамических высот между центрами циклонических круговоротов и прибрежными районами в эти месяцы составляет 24 дин · см.

В мае – июне происходит ослабление ОЧТ, что проявляется в уменьшении скоростей в основном потоке. Минимальные динамические высоты находятся в области западного циклонического круговорота. Пространственные контрасты динамических высот уменьшаются до 20 – 22 дин · см. Скорости в потоке ОЧТ в это время в среднем составляют 0,08 – 0,12 м/с. Максимальные скорости (до 0,16 – 0,18 м/с) отмечаются в северной и западной периферии западного круговорота. В юго-восточной части моря интенсифицируется Батумский антициклонический вихрь, который отчетливо прослеживается на картах поверхностных течений до ноября.

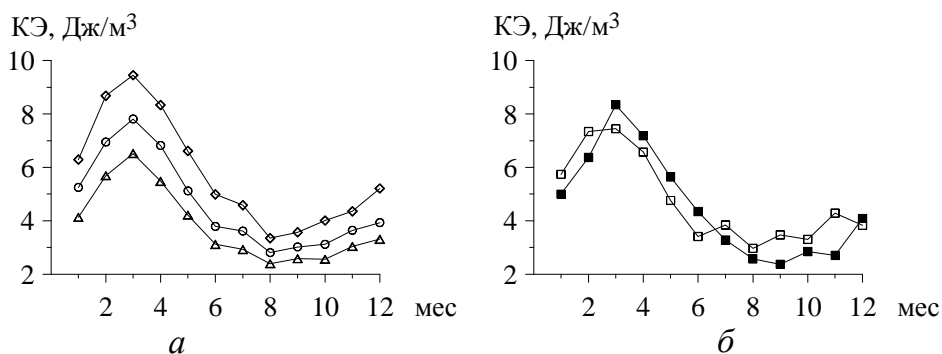
В июле – августе происходит дальнейшее ослабление ОЧТ и выделяются два крупномасштабных циклонических круговорота – западный и восточный. В июле скорости в потоке ОЧТ составляют в среднем 0,08 – 0,10 м/с. В августе отмечаются наименьшие в сезонном цикле скорости 0,06 – 0,09 м/с. Тем не менее перепад динамических высот по морю в августе достаточно велик ( $\sim 18$  дин · см), что обусловлено высокими значениями уровня моря в области Батумского антициклонического вихря. Минимальные динамические высоты находятся в области западного циклонического круговорота. В сентябре структура крупномасштабных круговоротов близка к наблюдаемой в июле и августе. В октябре деление на хорошо выделенные в предыдущие два месяца западный и восточный крупномасштабные круговороты исчезает. Полный контраст динамических высот по морю составляет 18 – 19 дин · см. Скорости в ОЧТ увеличиваются по сравнению со скоростями в августе, но в среднем они меньше июльских значений.



Р и с. 2. Среднеголетняя динамическая топография (дин · см) поверхности Черного моря относительно 500 дбар (отклонения от среднеголетнего значения уровня)

В ноябре происходит усиление циркуляции в восточной части моря, связанное с сезонным усилением циклонической завихренности ветра [9], центр которой (по данным реанализа *NCEP/NCAR*) находится над этой областью с ноября по март [3]. Здесь же отмечаются минимальные динамические высоты. В декабре скорости увеличиваются до 0,10 – 0,12 м/с. Полный контраст динамических высот на поверхности составляет 19 дин см. В январе – феврале происходит дальнейшее усиление ОЧТ. Перепад динамических высот 22 – 24 дин · см, скорости составляют в среднем 0,12 – 0,14 м/с.

Годовой ход средней на поверхности моря величины КЭ представляет собой годовую гармонику с максимумом в марте и минимумом в августе (рис. 3, *a*). Изменение поверхности отсчета меняет только его количественные характеристики. Как видно из рис. 3, *a*, кинетическая энергия, вычисленная от поверхностей 300 и 500 дбар, меньше по сравнению с расчетами от поверхности 1200 дбар. В западной и восточной частях моря (граница по 34° в. д.) внутригодовой ход средней на поверхности моря КЭ характеризуется следующими особенностями (рис. 3, *б*). В восточной части максимальные величины КЭ наблюдаются в феврале – марте, минимальные – в августе. В западной части максимальные величины КЭ отмечаются в марте – апреле, минимальные – в сентябре. В восточной части на фоне летнего ослабления течений отмечается увеличение КЭ в июле.



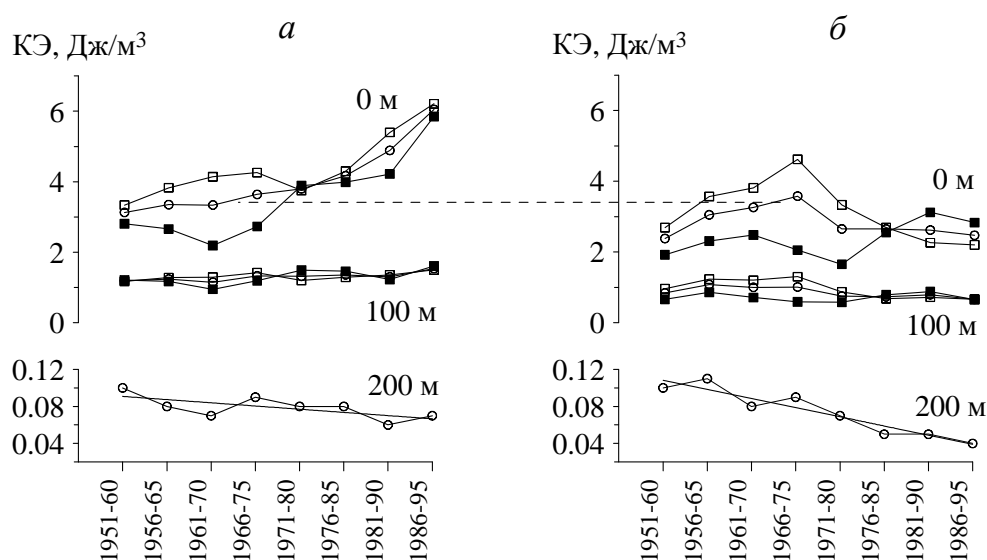
**Р и с. 3.** Годовой ход средней КЭ геострофической циркуляции на горизонте 0 м: *a* – в глубоководной части моря относительно 300 ( $\Delta$ ), 500 ( $\circ$ ) и 1200 ( $\diamond$ ) дбар; *б* – в западной ( $\blacksquare$ ) и восточной ( $\square$ ) частях моря относительно 500 дбар

Приведенные величины скоростей геострофических течений меньше вычисленных по данным измерений с помощью дрейфтеров [21]. Это объясняется тем, что скорости, полученные с помощью дрейфтеров, содержат также составляющие мезомасштабных вихреволновых движений (пропадающих при осреднении многолетних данных и сглаживании полей плотности), дрейфовых течений и инерционных колебаний [21]. В целом для приповерхностных течений скорости, вычисленные динамическим методом по климатическим полям плотности, составляют ~ 50% от скоростей крупномасштабных течений, полученных при инструментальных измерениях и осредненных для фильтрации высокочастотных шумов [22, 23]. На горизонтах глубже экмановского слоя, где геострофическая составляющая скорости течений является

преобладающей, различие между измеренными и рассчитанными скоростями течений уменьшается.

Долговременная изменчивость геострофической циркуляции. Описанный сезонный ход представляет собой средний климатический циркуляционный цикл в Черном море. Для анализа его временной изменчивости сравнивались междекадные изменения геострофической циркуляции двух сезонов – зимнего (февраль) и летнего (август) в период 1951 – 1995 гг. При этом оценивалась изменчивость кинетической энергии течений на поверхности и в основном пикноклине (на горизонтах 100 и 200 м).

Согласно расчетам для зимнего сезона, в исследуемый временной период в верхнем слое наблюдается интенсификация геострофических течений, а в нижней части пикноклина – их ослабление (рис. 4, *а*). Характер изменчивости в западной и восточной частях моря различен. На фоне общего положительного тренда, наблюдаемого в западной части, в 60-е гг. циркуляция ослабевала. В это же время и в начале 70-х гг. в восточной части моря отмечалось усиление течений, прослеживаемое до нижних слоев пикноклина. Более детально междекадные изменения геострофической циркуляции в зимний период и статистические оценки трендов приведены в [3]. В этой работе отмечается, что на фоне общей интенсификации течений в верхнем слое восточной части моря в юго-восточном регионе наблюдалась долговременная тенденция к ослаблению циркуляции.



**Р и с. 4.** Декадная изменчивость КЭ геострофической циркуляции относительно 300 дбар на горизонтах 0, 100 и 200 м (○ – в среднем по акватории, ограниченной изобатой 300 м, ■ – в ее западной части, □ – в восточной части): *а* – в феврале; *б* – в августе

В августе ситуация другая. В среднем по морю в конце 50-х – начале 70-х гг. отмечалось усиление циркуляции в верхнем слое, а в последующие периоды – ее ослабление (рис. 4, *б*). Как и зимой, тенденции изменений в



восточной и западной частях моря различны. Если в восточной части после указанного максимума происходит ослабление циркуляции в поверхностном слое, то в западной части, начиная с 80-х гг., она более интенсивна, чем в предыдущие периоды. Отрицательная тенденция на горизонте 200 м (в нижней части пикноклина) в летний сезон более выражена, чем в зимний (рис. 4). Коэффициент значимого на 90%-ном уровне линейного тренда средней на этом горизонте КЭ составляет  $-0,02 \text{ Дж/м}^3$  за 10 лет.

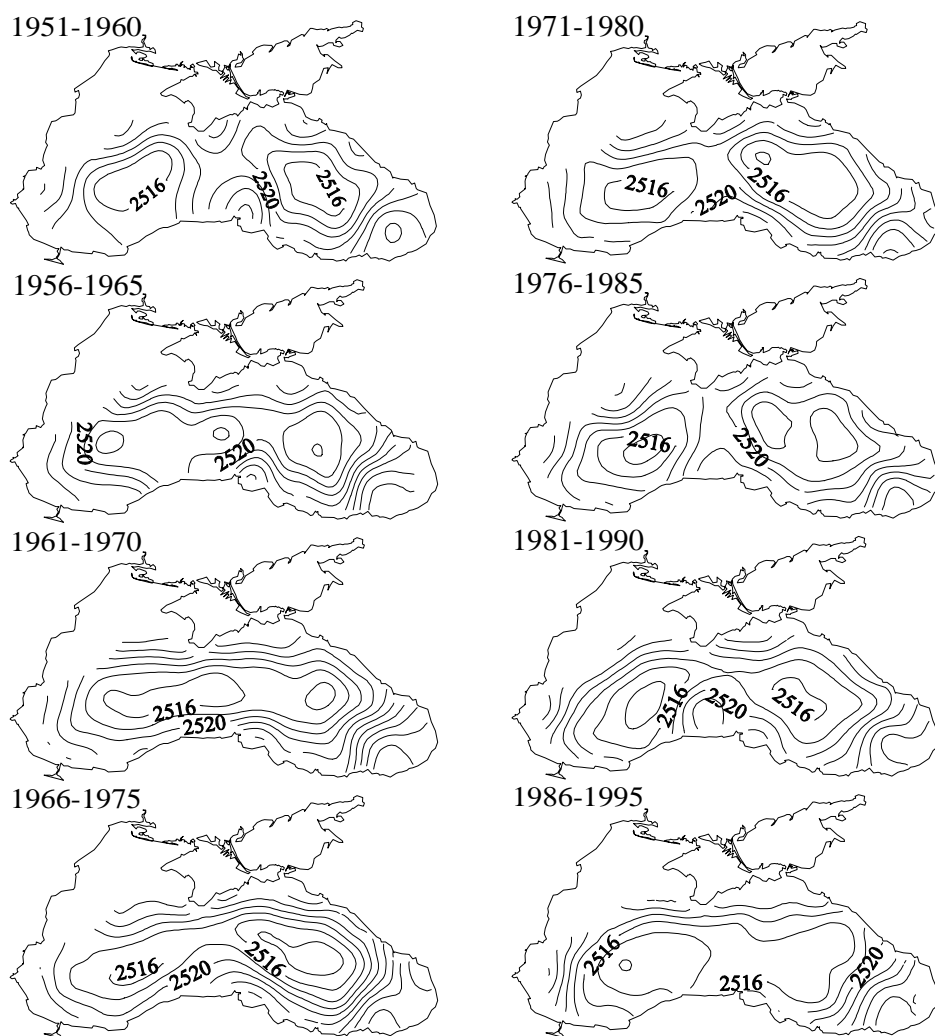
Для летнего периода характерно наличие в крупномасштабной структуре течений Батумского антициклонического вихря, а также других вихревых образований. Поэтому рассчитанная кинетическая энергия включает в себя энергию не только основного черноморского потока, но и вихрей, размеры которых сопоставимы или превышают радиус проведенного сглаживания полей плотности.

Междесятилетние изменения пространственной крупномасштабной структуры течений в августе приведены на рис. 5. Видно, что характерное для климатического поля в этом месяце разделение ОЧТ на два круговорота (рис. 2) отсутствовало в осредненных полях в 60-е и с середины 80-х гг. (рис. 5). Минимальные динамические высоты в 1966 – 1975 и 1971 – 1980 гг. находились в восточной части моря, в последующие периоды – в западной. Отметим, что зимой, когда ОЧТ более интенсивно, пространственная структура крупномасштабной циркуляции изменяется незначительно от одного десятилетия к другому в отличие от лета [3].

Количественное сравнение величин КЭ геострофической циркуляции в зимний и летний сезоны дало следующие результаты. В среднем по глубоководной акватории в 60-е – начале 70-х гг. интенсивность циркуляции в августе сравнима с интенсивностью в феврале (рис. 4, штриховая линия). В августе 1961 – 1970 гг. циркуляция поверхностных вод в западной части моря не уступает по интенсивности циркуляции в феврале, а циркуляция в восточной части в 1966 – 1975 гг. даже более интенсивна, чем зимой (рис. 4). Таким образом, в 60-е – начале 70-х гг. летняя геострофическая циркуляция по интенсивности мало уступает зимней. В последующие десятилетия ситуация меняется. Зимой наблюдается многолетняя тенденция к усилению течений. Летом, наоборот, циркуляция ослабевает, что должно приводить к увеличению амплитуды сезонного хода.

При определении изменчивости сезонного хода геострофической циркуляции расчеты проводились для двух 25-летних периодов: 1951 – 1975 и 1976 – 2000 гг. Сезонный ход изменчивости КЭ в 1976 – 2000 гг. (рис. 6) отражает современные представления о внутригодовой изменчивости геострофической циркуляции в Черном море, он близок к климатическому, приведенному на рис. 3. Это обусловлено прежде всего тем, что наибольшее количество измерений выполнено именно в этот период. График внутригодовой изменчивости КЭ в 1951 – 1975 гг. (рис. 6) показывает, что наряду с зимней

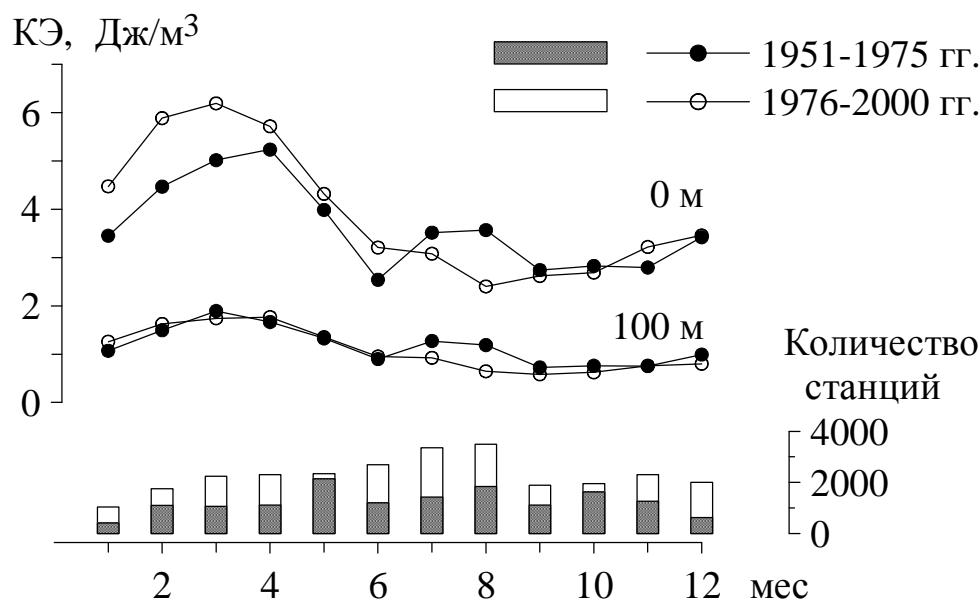
интенсификацией циркуляции наблюдалось ее усиление в летние месяцы (июль и август). Минимальные значения КЭ отмечаются в июне. Ее средние величины в зимние месяцы в этот период ниже, чем в 1976 – 2000 гг., а максимум смещается на апрель. Амплитуда внутригодового хода во второй период больше, чем в первый.



**Р и с. 5.** Поля динамической топографии (дин · см) поверхности Черного моря в августе относительно 300 дбар, осредненные за десятилетние периоды

Наибольшие расхождения в количественных характеристиках сезонного цикла для двух периодов отмечаются в зимние и летние месяцы. Достоверность долговременных изменений интенсивности геострофических течений в феврале оценивалась в работе [3], где показано, что тенденция к усилению циркуляции в верхнем 50-метровом слое является статистически значимой.

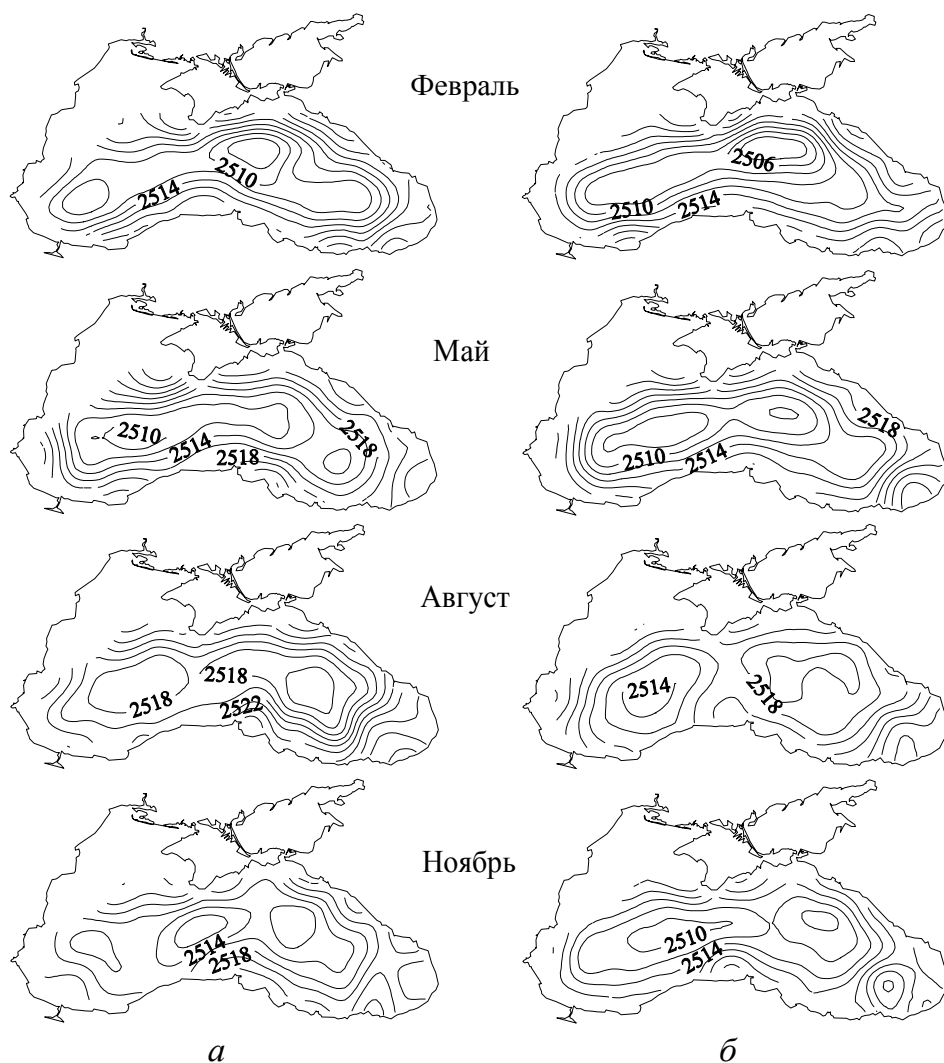
Август лучше других месяцев обеспечен данными измерений, что позволяет исследовать статистическую значимость полученных результатов путем проведения повторных расчетов геострофических скоростей по разным выборкам. С этой целью для каждого 25-летнего периода проводились вычисления по 10 случайным выборкам, содержащим 50% данных. Расчеты показали, что разница величин КЭ для августа статистически значима. В июне измерений меньше, поэтому для подтверждения полученных оценок данные этого месяца разбивались на четыре независимых десятилетних периода (1955 – 1965, 1966 – 1974, 1975 – 1985, 1986 – 1995 гг.), каждый из которых обеспечивал возможность расчетов геострофических течений. Полученные результаты подтвердили наличие минимума в июне в 1951 – 1975 гг. (рис. 6).



**Р и с. 6.** Годовой ход средней КЭ геострофической циркуляции относительно 300 дбар на горизонтах 0 и 100 м по данным 1951 – 1975 гг. (●) и 1976 – 2000 гг. (○) и количество станций, выполненных в эти периоды

Изменения крупномасштабной структуры циркуляции можно проанализировать на основе сравнения карт динамической топографии поверхности моря двух периодов (рис. 7). В феврале 1976 – 2000 гг. циркуляция в западной части и в окрестности центра восточного циклонического круговорота более интенсивна, чем в феврале 1951 – 1975 гг. В юго-восточной части отмечается ослабление геострофических течений. В мае интенсивность ОЧТ изменяется мало. В августе хорошо заметно усиление циркуляции в западной части и ослабление – в восточной. В ноябре в западной части циркуляция интенсивнее во второй период, чем в первый. В совокупности по картам динамической топографии поверхности моря за февраль, август и ноябрь можно отметить интенсификацию циркуляции в западной и ослабление в юго-восточной части моря во второй период.

Таким образом, анализ междекадной изменчивости геострофической циркуляции в зимний и летний сезоны, а также расчеты годового цикла для двух 25-летних периодов продемонстрировали наличие изменений как в крупномасштабной структуре течений, так и в значениях средних величин КЭ.



**Р и с. 7.** Динамическая топография (дин · см) поверхности Черного моря относительно 300 дбар по данным 1951 – 1974 гг. – *а* и 1975 – 2000 гг. – *б*

**Обсуждение.** Малое количество данных наблюдений в Черном море до 60 – 70-х гг. – главная проблема при исследовании долговременной изменчивости динамических полей. Поэтому выяснение ее причин на основе поиска связей с внешними факторами является не только самостоятельной задачей. Сведения об изменениях этих факторов могут служить критерием достоверности результатов при исследовании изменчивости динамических характери-

стик по редким данным, а также быть основой при восполнении недостатка информации (например в задачах реанализа термохалинных и динамических полей на основе численного моделирования).

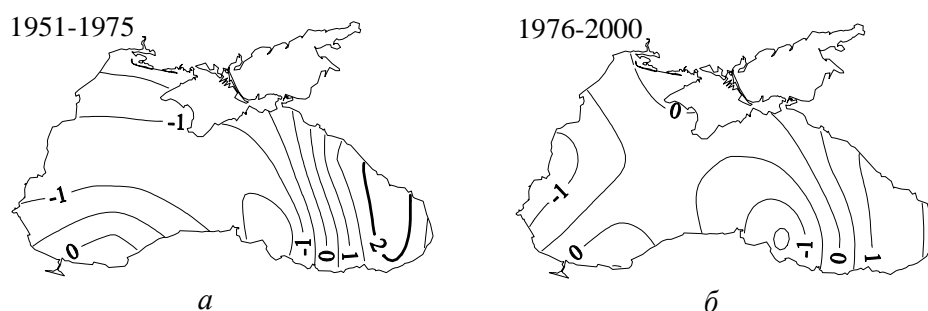
Для выявления причин временной изменчивости геострофических течений необходимо изучение всех факторов, генерирующих циркуляцию и определяющих ее изменения. Такими факторами являются воздействие ветра и потоки плавучести на поверхности моря и боковых границах (потоки тепла, осадки, испарение, сток рек и водообмен через проливы). На структуру циркуляции также влияют рельеф дна и конфигурация береговой линии. Единого мнения об относительной роли каждого фактора в генерации циркуляции Черного моря и ее изменчивости пока нет. Но, судя по публикациям последних лет, наиболее существенная роль отводится ветру. Численные модельные эксперименты и расчеты с привлечением спутниковых данных по альтиметрии моря показывают, что ветер является определяющим фактором, влияющим на циркуляцию вод [9, 14, 24 – 26].

Сезонную изменчивость (зимне-весеннюю интенсификацию течений) связывают с усилением завихренности ветра над акваторией моря [9, 27, 28] и увеличением градиентов плотности между шельфом и глубоководными районами в зимний период [8].

Межгодовые вариации циркуляции в Черном море обусловлены изменениями внешних факторов, связанными с изменчивостью крупномасштабных атмосферных процессов [29]. Исследования межгодовой изменчивости синоптических условий в Черноморском регионе и завихренности ветра, проведенные с использованием данных реанализа NCEP/NCAR, выявили долгосрочную тенденцию к уменьшению количества циклонов над морем [30, 31] и ослаблению завихренности ветра [3] зимой в период с конца 60-х до середины 90-х гг. При этом зимняя геострофическая циркуляция в поверхностном слое, как показано выше, усиливается. Объяснением этого противоречия может служить сделанный по результатам численного моделирования [9] и анализа связей с изменчивостью ветра (по многолетним данным [3, 4] и данным летне-осеннего сезона 1999 – 2000 гг. [32]) вывод о том, что циркуляция зависит не только от степени завихренности ветра в среднем по морю, но и от его пространственно-временного распределения.

Поля завихренности напряжения ветра в июле – августе, вычисленные по данным реанализа NCEP/NCAR о скорости ветра, показывают усиление циклонической завихренности в восточной части моря в 1951 – 1975 гг. (рис. 8, *a*), что может быть причиной интенсификации геострофических течений в эти месяцы в данный период (рис. 6). Также это согласуется с усилением циркуляции в восточной части моря в 60-е – начале 70-х гг., полученным при исследовании декадной изменчивости в августе (рис. 4, *б*).

Тем не менее, однозначный ответ на вопрос о причинах изменчивости интенсивности течений не может быть получен до тех пор, пока не будут исследованы все факторы, обуславливающие циркуляцию вод. В частности, для выяснения причин ослабления течений в нижнем слое пикноклина необходимо исследование долговременной изменчивости потоков плавучести на поверхности моря и боковых границах.



**Р и с. 8.** Поля  $\text{rot } \tau_w$  ( $\times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ ) для июля – августа по данным 1951 – 1975 гг. – *а* и 1976 – 2000 гг. – *б*

### Выводы

В работе показано, что изменчивость течений декадных временных масштабов, по-разному проявляющаяся в различные сезоны, приводит к изменениям количественных характеристик сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море.

Сезонный ход интенсивности геострофических течений, вычисленный по климатическому массиву данных (1910 – 2000 гг.), характеризуется усилением циркуляции в зимний период (с максимальными скоростями течений в марте) и ослаблением в летний (с минимумом скорости в августе). Такой сезонный ход, формально являясь среднегодовой характеристикой, фактически более типичен для 80 – 90-х гг., поскольку большинство гидрологических измерений приходится именно на этот период. Сравнение междекадной изменчивости циркуляции в феврале и августе по данным 50 – 90-х гг. показало, что в 60-е гг. циркуляция в летний сезон была более интенсивной и по количественным характеристикам скорости течений близкой к циркуляции в феврале. Последующее ослабление летней циркуляции декадных масштабов и усиление зимней приводит к увеличению амплитуды годового хода скорости черноморских течений.

Исследования долговременных изменений циркуляции в Черном море далеко не завершены. Не ясно, как развивались циркуляционные тенденции в последние десять лет, поскольку количество экспедиционных наблюдений в этот период резко уменьшилось. Для выяснения причин выявленных изменений в 1950 – 1990 гг. необходим дальнейший анализ связи циркуляции вод со всеми внешними факторами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кныш В.В., Коротаяев Г.К., Демьяшев С.Г., Белокопытов В.Н. Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солености и их ассимиляции в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 11 – 30.
2. Дорофеев В.Л., Кныш В.В., Коротаяев Г.К. Оценка долговременной изменчивости гидрофизических характеристик Черного моря на основе ассимиляции климатических гидрологических и альтиметрических полей // Там же. – 2006. – № 4. – С. 3 – 17.

3. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Декадная изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 4. – С. 75 – 91.
4. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2006. – 42, № 3. – С. 419 – 430.
5. *Филиппов Д.М.* Циркуляция и структура вод Черного моря. – М.: Наука, 1968. – 137 с.
6. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
7. *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.
8. *Ибраев Р.А., Трухчев Д.И.* Диагноз климатической сезонной циркуляции и изменчивости холодного промежуточного слоя Черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 1996. – 32, № 5. – С. 655 – 671.
9. *Демьяшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К.* Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2002. – № 3. – С. 12 – 25.
10. *Белокопытов В.Н.* Сезонная изменчивость термохалинной и гидролого-акустической структуры вод Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – Вып. 8. – С. 12 – 23.
11. *Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет* / Под общ. ред. В.Н. Еремеева. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – 704 с.
12. *Обработка данных океанографической станции*. – Севастополь: ЮНЕСКО – МГИ НАН Украины, 1993. – 136 с.
13. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солёности в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. – 2008. – № 1. – С. 51 – 65.
14. *Korotaev G., Oguz T., Riser S.* Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // *Deep-Sea Res.* – 2006. – II, № 53. – P. 1901 – 1910.
15. <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>
16. *Hellerman S., Roserstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13, № 7. – P. 1093 – 1104.
17. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *Ibid.* – 1981. – 11, № 3. – P. 324 – 336.
18. *Овчинников И.М., Титов В.Б.* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // *Доклады АН СССР*. – 1990. – 314, № 5. – С. 1236 – 1239.
19. *Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.J.* Seasonal, interannual and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, № C4, 3122, doi:10.1029/2002JC001508.
20. *Oguz T., Latun V.S., Latif M.A. et al.* Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1993. – I, № 40. – P. 1597 – 1612.
21. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // *Океанология*. – 2003. – 43, № 6. – С. 1 – 15.
22. *Богатко О.Н., Богуславский С.Г., Беляков Ю.М., Иванов Р.И.* Поверхностные течения Черного моря // *Комплексные исследования Черного моря*. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1979. – С. 25 – 33.
23. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1999. – I, № 46. – P. 1733 – 1753.

24. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P.* Seasonal variability of wind and thermohaline-driven circulation in the Black Sea: Modeling studies // *J. Geophys. Res.* – 1996. – 101, № C7. – P. 16551 – 16569.
25. *Stanev E.V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation // *Earth-Sci. Rev.* – 1990. – 28, № 4. – P. 285 – 319.
26. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea dynamics // *Oceanogr.* – 2005. – 18, № 2. – P. 56 – 75.
27. *Коротаев Г.К.* О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
28. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2002. – 38, № 2. – С. 247 – 258.
29. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н., Ворли С.* Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // *Морской гидрофизический журнал.* – 2004. – № 2. – С. 42 – 59.
30. *Бардин М.Ю., Полонский А.Б.* Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в европейско-атлантическом регионе в зимний период // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2005. – 41, № 2. – С. 147 – 157.
31. *Полонский А.Б., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // *Морской гидрофизический журнал.* – 2007. – № 6. – С. 47 – 58.
32. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Поялков С.Г. и др.* Влияние поля ветра на динамику вод Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А.Г. Зацепин, М.В. Флинт.* – М.: Наука, 2002. – С. 91 – 105.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: apol@alpha.mhi.iuf.net

Материал поступил  
в редакцию 26.08.08  
После доработки 22.12.08

**АНОТАЦІЯ** На основі обробки архівних гідрологічних даних аналізується сезонний хід геострофічної циркуляції в Чорному морі і його довгоперіодна мінливість. Показано, що мінливість течій декадних (десятилітніх) часових масштабів, яка по-різному проявляється в різні сезони, призводить до змін в характеристиках сезонного ходу геострофічної циркуляції в другій половині XX ст. Посилення зимової циркуляції і ослаблення літньої з середини 1970-х рр. призводить до збільшення амплітуди річного ходу швидкості течій на поверхні моря. Обговорюються вірогідні причини мінливості інтенсивності геострофічних течій у Чорному морі.

**ABSTRACT** Seasonal variation of the Black Sea geostrophic circulation and its long-term variability in the 20<sup>th</sup> century are analyzed based on processing of archival hydrological data. It is shown that current variability on decadal scales revealing itself in different ways in different seasons, results in changes of the characteristics of seasonal variation of geostrophic circulation in the second part of the 20<sup>th</sup> century. Intensification of winter circulation and weakening of summer one beginning from mid 70ies, lead to increase of the annual variation amplitude of current velocities on the sea surface. Possible reasons of variability of geostrophic current intensity in the Black Sea are discussed.