

УДК 551.465 (262.5)

В.Н.Белокопытов, к.г.н.

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОТНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

На основе реанализа данных океанографических наблюдений выявлены общие тенденции долговременных изменений плотностной структуры Черного моря в XX веке. Рассматривается характер низкочастотной изменчивости вертикальной стратификации, горизонтальных градиентов плотности и интенсивности геострофической циркуляции для различных слоев моря. Обсуждаются внешние факторы, воздействующие на структуру плотности моря и их относительная роль.

Ключевые слова: *плотность воды, стратификация, циркуляция моря, климатическая изменчивость, Черное море.*

Введение. Среди различных направлений климатической науки, которой посвящен обширный объем литературы, вопросы климатических изменений в Мировом океане и отдельных морях в последнее время стали привлекать больше внимания. Черное море не является исключением, и это обусловлено, в том числе, и тем, что межгодовые и десятилетние колебания составляют значительную часть общей изменчивости термохалинной структуры. Явное преобладание сезонного цикла, которое можно выразить как отношение дисперсии сезонных колебаний к дисперсии низкочастотной изменчивости, наблюдается лишь в поверхностном слое 0–20 м, для температуры воды это отношение ~ 80 , для солености $\sim 2,5$. В более глубоких слоях сезонная изменчивость резко уменьшается и многолетние колебания становятся доминирующими.

Последние исследования и публикации. Большая часть литературы о межгодовой изменчивости и долгопериодных тенденциях Черного моря посвящена непосредственно температуре и солености, из последних публикаций можно отметить [1]. Такой важной физической характеристике как плотность, от пространственного распределения которой зависит вертикальный обмен и интенсивность циркуляции моря, уделялось гораздо меньше внимания. В одной из первых работ [2] были описаны многолетние колебания вертикального положения пикноклина, а наблюдаемый подъем верхней границы сероводородной зоны во второй половине XX века был объяснен подъемом пикноклина. В работе [3] эта тенденция была уточнена на региональном уровне: по данным на “вековых разрезах” был сделан вывод о разнонаправленных вертикальных движениях пикноклина в западном и восточном циклонических круговоротах. Далее в [4,5], наряду с медленными вертикальными движениями границ пикноклина, были выявлены изменения самих значений параметров стратификации: рост статической устойчивости в области максимальных градиентов плотности 50 – 100 м более чем на 20 % (зимой более чем в 1,5 раза), и, в то же время, уменьшение устойчивости на более глубоких горизонтах (300 м) в среднем на $\sim 10\%$. Специальные оценки для горизонтальных градиентов плотности не публиковались, но косвенным образом они учитывались в оценках многолетней изменчивости доступной потенциальной энергии (ДПЭ), кинетической энергии (КЭ) циркуляции моря или уклонов динамических поверхностей. Так, в междесятилетних колебаниях ДПЭ отмечалось ее понижение к середине 1970-х и вновь дальнейшее повышение [6]. Интенсивность циркуляции моря возрастала, согласно [7], в 1950–1990-х гг., по [8] с 1971 по 1993 гг. По результатам [9] в 1992–2002 гг. происходило уменьшение КЭ, а в [10], в отличие от всех остальных работ, делается вывод о постоянном снижении интенсивности геострофических течений у берегов Крыма и Кавказа на протяжении

всего периода 1959–1995 гг. В [3] представлена картина разнонаправленных тенденций – интенсификация циркуляции вод в области западного циклонического круговорота в 1960–70-е годы и ее ослабление в восточном циклоническом круговороте с середины 1960-х до конца 1980-х гг.

Нерешенными вопросами остаются причины многолетних колебаний положения пикноклина, параметров стратификации и интенсивности циркуляции моря, а также временной ход этих характеристик в первой половине XX века и в современный период после 2000 г.

Цель статьи – выявление общих закономерностей климатической изменчивости пространственной структуры плотности воды в Черном море для всего периода океанографических наблюдений, начиная с 1920-х гг.

Данные наблюдений и методы исследования. Основными материалами послужили данные океанографических съемок (1923–2012 гг.), для современного периода – буи-профилемеры ARGO (2002–2012 гг.) и дрейфтеры (2000–2010 гг.). Также использовались спутниковые данные о температуре поверхности моря (1985–2012 гг.) и данные береговых гидрометстанций (с 1900 г.).

На основе этих данных была проведена реконструкция термохалинной структуры моря (реанализ среднемесячных полей) с пространственным разрешением $10' \times 15'$ за период 1923–2012 гг. Методика реанализа состояла из нескольких этапов: расчета предварительного массива методом оптимальной интерполяции (ОИ) с использованием известных оценок корреляционной структуры полей (без заполнения крупных пропусков в данных); разложения массива ОИ на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ); восстановления полей обратными процедурами по временным коэффициентам ЭОФ (заполнение пропусков). Заключительная часть алгоритма реализована в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_t &\approx \sum_{i=1}^L \hat{\beta}_{ti} \boldsymbol{\psi}^i, \\ \beta_{ti} &\approx \sum_{j=1}^M \hat{\alpha}_{tj} \mathbf{e}^j, \end{aligned}$$

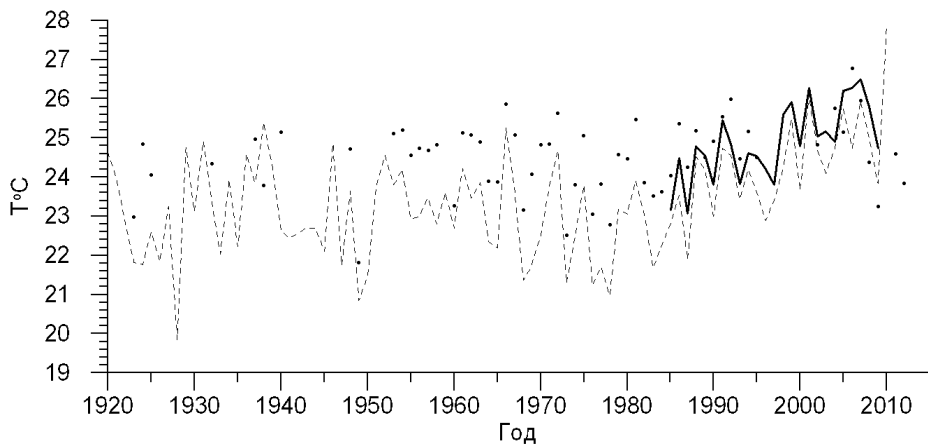
где \mathbf{x}'_t – восстанавливаемый вектор (поле) в виде аномалий от климатического среднего в момент времени t ; β_{ti} – вектор временных коэффициентов i -й вертикальной моды ЭОФ, $\boldsymbol{\psi}^i$ – i -я вертикальная мода ЭОФ (функция от z); α_{tj} – временной коэффициент j -й горизонтальной моды ЭОФ; \mathbf{e}^j – j -я горизонтальная мода ЭОФ временных коэффициентов i -й вертикальной моды ЭОФ (функция от x, y); M – количество горизонтальных мод; L – количество вертикальных мод, участвующих в восстановлении полей; $\hat{}$ – символ оператора статистической оценки.

Более подробно данная методика реанализа изложена в [11], далее в тексте при обсуждении результатов, если не указан источник, то подразумевается ЭОФ-реанализ.

Для сравнения различных интегральных оценок кинетической энергии циркуляции в Черном море использовались результаты реанализа на основе гидродинамических моделей: [8] для периода 1971–1993 гг. и [9] для 1992–2002 гг., а также спутниковые альтиметрические данные о высоте уровня морской поверхности для 1992–2012 гг. [<http://www.avisioceanobs.com>].

Анализ результатов. В первую очередь следует рассмотреть многолетнюю изменчивость основных факторов, определяющих плотность воды, – температуры и солености. Общий характер изменений температуры в Черном море за 100-летний период наблюдений представляет собой циклический процесс при общей тенденции к потеплению (рис.1,2). Выделяются два холодных периода: с середины 1920-х до конца

1950-х гг. и с начала 1980-х до конца 1990-х гг.; а также два теплых периода: 1960–1980 гг. и современный этап, начавшийся в конце 1990-х гг. Аномалии летнего периода года ограничены верхним 20-метровым слоем (рис.1) и не проникают глубже сезонного термоклина. Аномалии зимнего периода, сохраняющиеся длительное время в холодном промежуточном слое (ХПС), прослеживаются во всем слое постоянного пикноклина (рис.2). Наиболее выраженные минимумы теплозапаса, такие как в 1980–1990-х гг. и в конце 1920-х – начале 1930-х гг., формируются в условиях, когда несколько холодных зим следуют друг за другом.



Штриховая линия - осредненные значения по станциям Евпатория, Севастополь и Ялта; сплошная линия – средние по акватории моря спутниковые данные, символы – средние по акватории моря оценки по ЭОФ-реанализу.

Рис.1 – Временной ход температуры воды на поверхности Черного моря в августе по среднемесячным данным.

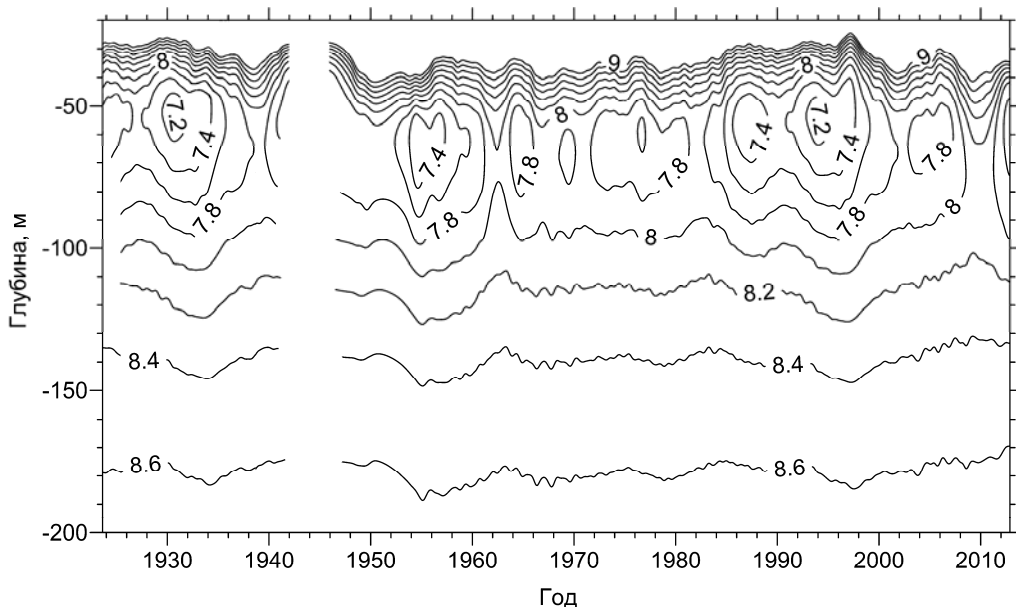


Рис.2 – Температура воды Черного моря в слое 20 – 200 м по среднемесячным данным (изотермы выше 9°C не показаны).

При описании сглаженного многолетнего хода солёности, можно считать, что верхний слой моря был относительно пресным в период 1920–1954 гг., солёным в 1954–1980 гг. и снова пресным, начиная с 1980-х гг. (рис.3). В отличие от температуры

воды, где изменчивость слоя 0–50 м является определяющей для общего теплозапаса моря, основные изменения солезапаса сосредоточены в более глубоких слоях, большей частью в постоянном галоклине (рис.3).

Отличительной особенностью Черного моря является различный характер низкочастотной изменчивости термohалинных характеристик в верхнем 50-метровом слое и в более глубоких слоях воды. Если в верхнем слое моря хорошо выражены междесятилетние колебания, то в глубинном слое наблюдаются устойчивое нагревание и осолонение.

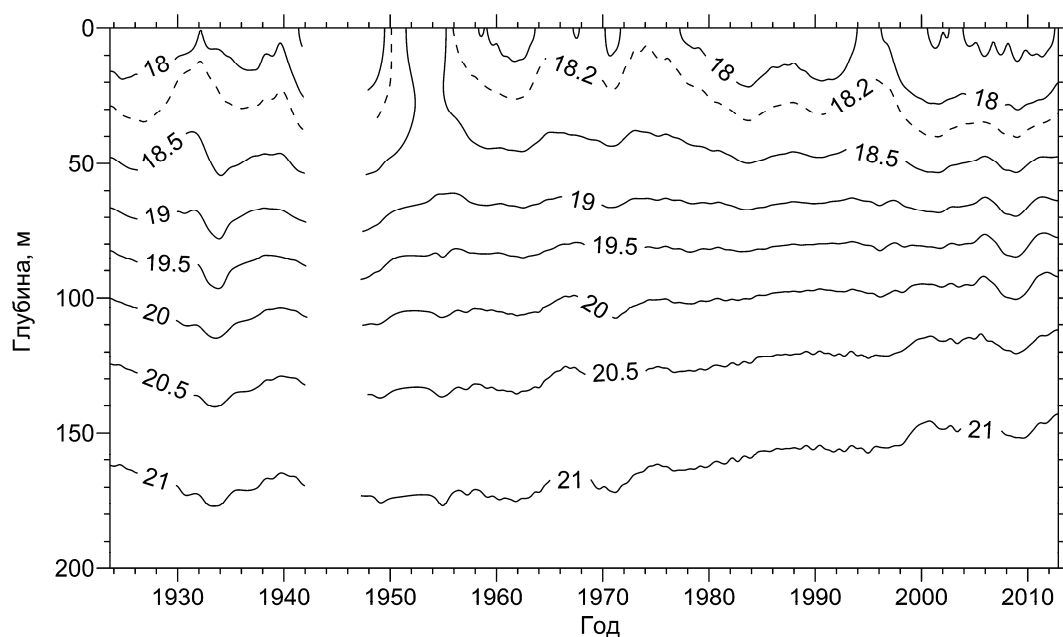


Рис.3 – Соленость воды Черного моря в слое 0 – 200 м по среднемесячным данным.

Многолетние колебания температуры и солености в виде чередования потеплений/похолоданий, осолонений/распреснений совместно формируют изменения плотностной структуры. В частности, в современный период значительного потепления и опреснения, плотность поверхностного слоя уменьшилась в сравнении с 1970-ми гг. на 0,5 единиц условной плотности зимой и на 1 единицу летом. Для вертикальной стратификации плотности (рис.4) в слое глубже 100 м прослеживается длительная отрицательная тенденция, что связано с общим потеплением и осолонением основного пикноклина. В верхнем слое 0–50 м во время более пресных периодов (до 1950-х и после 1980-х гг.) стратификация обостряется, увеличиваясь в 1,5 раза, вертикальный обмен ослабевает.

В среднем, термическая устойчивость в поверхностном слое Черного моря превышает соленостную устойчивость в 2–3 раза, глубже ядра ХПС (в среднем 60 м) вклад термической устойчивости становится отрицательным (слабая неустойчивость). Начиная с 40 м, соленостная устойчивость преобладает, в пикноклине она превышает термическую устойчивость на два порядка. С точки зрения многолетних изменений, термическая устойчивость в слое 0–200 м не имеет четко выраженных тенденций, увеличиваясь по абсолютному значению лишь в периоды интенсивного обновления ХПС. В целом, вклад солености в вертикальную устойчивость является определяющим, поэтому во временном ходе суммарной стратификации плотности проявляются те же многолетние тенденции, что и для стратификации солености.

Аналогичным образом происходят изменения параметров горизонтальной плотностной структуры, в частности, перепада плотности между центральной частью моря и периферией. Эта характеристика, непосредственно связанная с циркуляцией моря, также увеличивается в относительно пресные периоды и уменьшается при осолонении поверхностного слоя (рис.5). Исключение представляет собой период конца 1960-х – начала 1970-х гг., когда горизонтальные градиенты плотности возросли во всей толще вод, несмотря на повышенную соленость поверхностного слоя (о возможных причинах ниже).

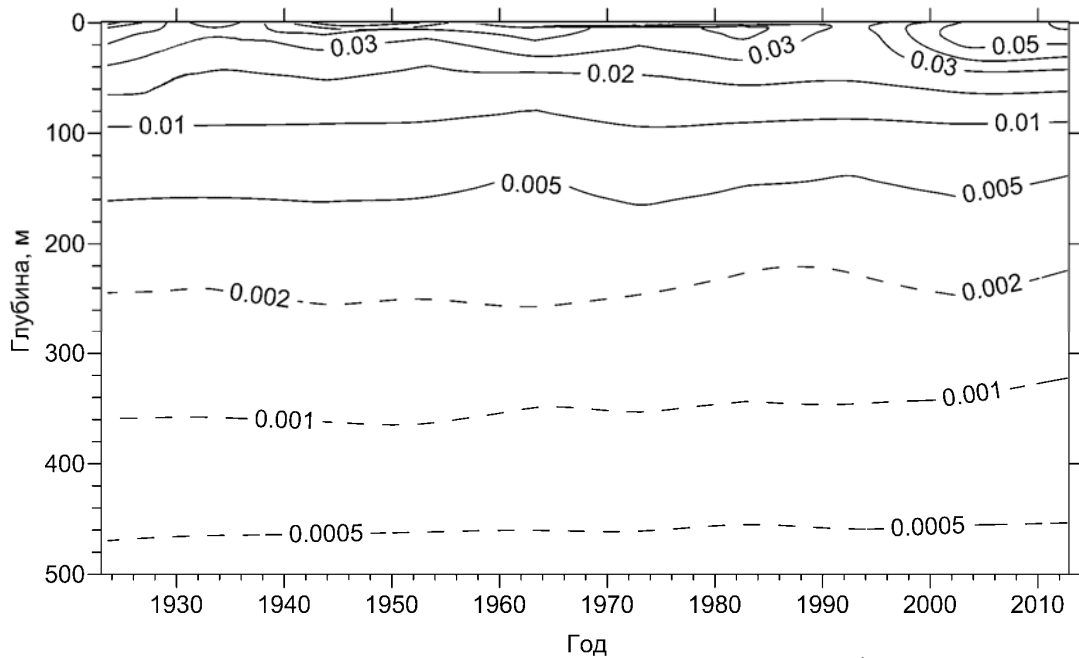


Рис.4 – Вертикальный градиент плотности воды ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-4}$) в Черном море, рассчитанный по среднемесячным данным в слое 0 – 500 м.

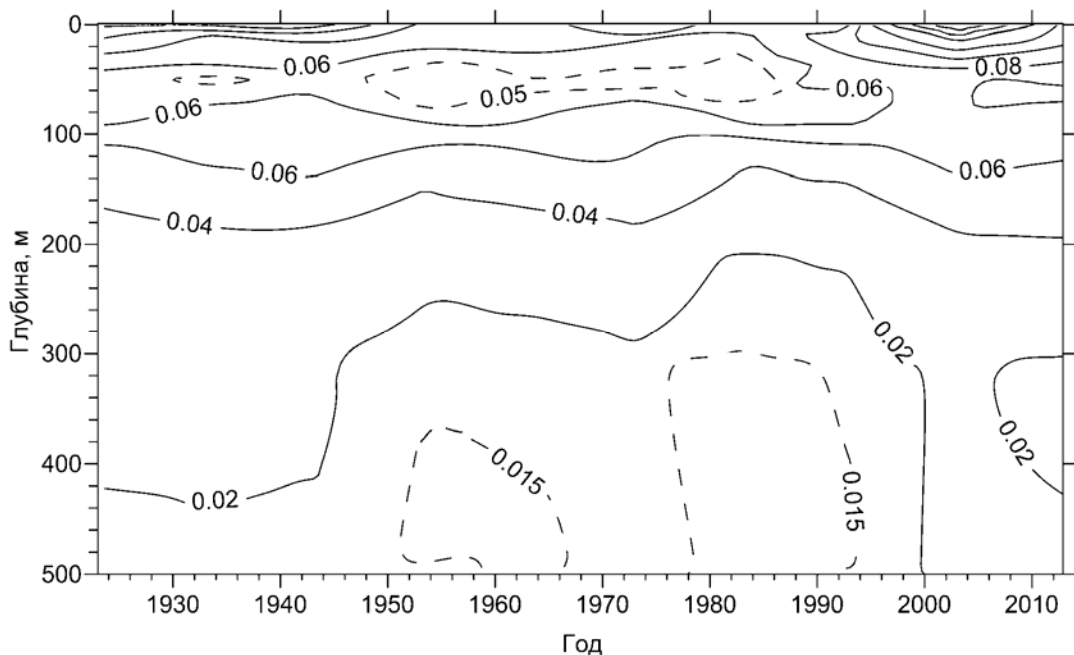
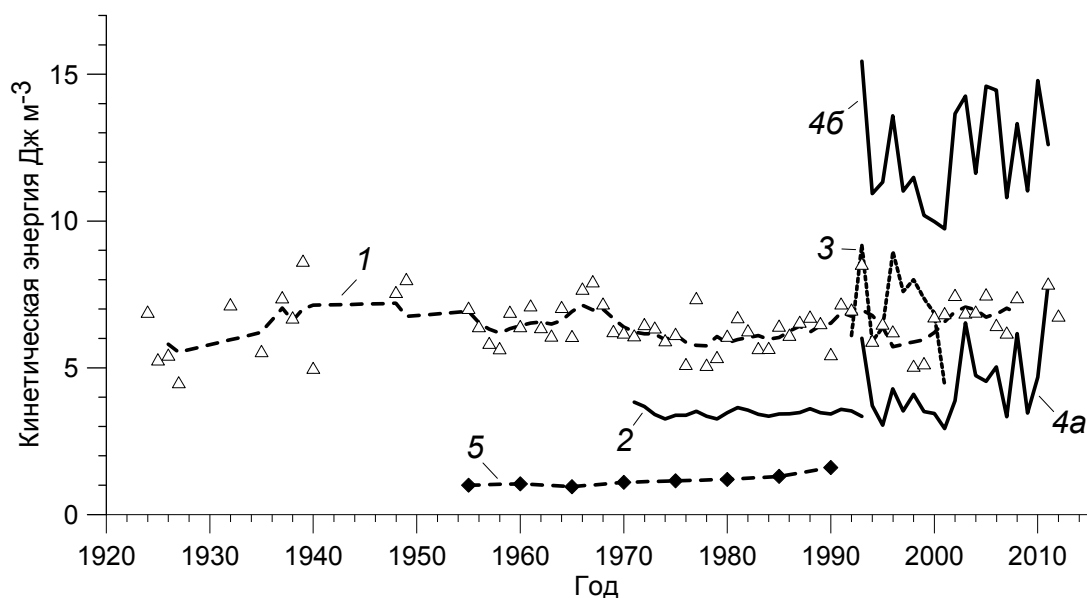


Рис.5 – Горизонтальный градиент плотности ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}/10 \text{ км}$) в Черном море, рассчитанный по среднемесячным данным в слое 0 – 500 м.

Такого же рода закономерности прослеживаются и во временном ходе интенсивности циркуляции моря (рис. 6,7). На рис.6 представлены оценки средней по морю кинетической энергии геострофических течений по различным источникам. Несмотря на значительные отличия в абсолютных значениях КЭ, вызванных различием методик, пространственным разрешением и степенью сглаженности исходных полей, общие тенденции в основном совпадают. Периоды уменьшения/увеличения КЭ чередуются следующим образом: уменьшение интенсивности циркуляции с середины 1960-х гг. до середины 1970-х гг., увеличение с середины 1970-х до начала 1990-х гг., уменьшение интенсивности в 1990-х гг., увеличение после 2000 г.

Из новых результатов наиболее важными являются: оценка временного хода в первой половине XX века, представляющего собой рост интенсивности циркуляции от 1920-х к 1940-м гг. и дальнейшее ее снижение вплоть до начала 1960-х гг., а также отсутствие разнонаправленных тенденций в поверхностном и глубинном слоях моря, которые были отмечены в [7].



1 — по ЭОФ-реанализу; 2 — по [8]; 3 — по [9]; 4а — рассчитанные по [<http://www.aviso.oceanobs.com>] без коррекции; 4б — с коррекцией по методу [12]; 5 — по [7];

Рис.6 — Среднегодовые значения кинетической энергии ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$) геострофических течений на поверхности Черного моря.

Из внешних факторов, воздействующих на структуру плотности в Черном море, наиболее существенное влияние оказывает водный и солевой баланс. В фазы увеличения баланса пресных вод (или уменьшения испарения) происходит распреснение верхнего слоя, в нем усиливается вертикальная стратификация и ослабевает вертикальный обмен. Горизонтальное распределение составляющих водного баланса неравномерно: влияние речного стока и атмосферных осадков максимально в прибрежной зоне, максимумы испарения приурочены к областям максимальной скорости ветра на северо-западе и северо-востоке моря. Поэтому общее распреснение сопровождается усилением горизонтальной стратификации и интенсификацией циркуляции моря.

Медленное, но устойчивое увеличение общего солезапаса в слое 100–2000 м на протяжении последних 100 лет свидетельствует о продолжающемся увеличении объема мраморноморских вод, при этом общий баланс соли не соблюдается. Процесс

постоянного осолонения сопровождается «подъемом» галоклина, ослаблением стратификации в пикноклине и в более глубоких слоях, промежуточная и глубинная водные массы становятся более однородными.

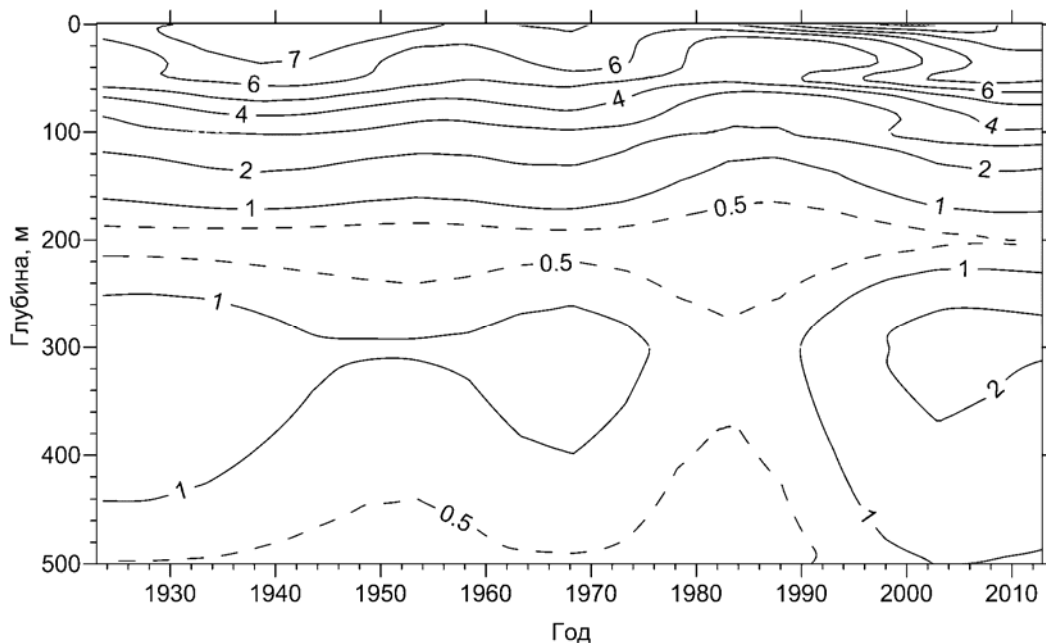


Рис.7 – Кинетическая энергия ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$) геострофических течений в Черном море, рассчитанная по среднемесячным данным в слое 0 – 500 м.

Другой важный фактор для горизонтальной структуры плотности – ротор касательного напряжения приводного ветра. Усиление циклонической завихренности ветра обостряет куполообразную форму изопикнических поверхностей, которая сама по себе является результатом дивергенции полных потоков дрейфовых течений (“Ekman pumping”) и, соответственно, подъема высокосоленных вод в центральной части моря. Упомянутый выше локальный максимум горизонтального перепада плотности и интенсивности циркуляции в конце 1960-х – начале 1970-х гг. связан с максимумом циклонической завихренности ветра, который хорошо выделяется по атмосферным реанализам ERA и NCEP. Увеличение ротора касательного напряжения ветра, как и распреснение поверхностного слоя, обеспечивает рост значений горизонтальных градиентов плотности по всей вертикали. Следует отметить, что временной ход КЭ может, как следовать за ходом ротора ветра (в 1960-х – середине 1970-х гг.), так и быть противоположным ему (с середины 1970-х по 1990-е гг.). В последнем случае вклад водного баланса более значителен. После 1990-х гг. эти два фактора действуют в одном направлении – повышение завихренности поля ветра происходит в условиях продолжающегося распреснения поверхностного слоя.

Еще один внешний фактор, влияющий на структуру плотности, это интенсивность зимнего конвективного перемешивания. Наиболее явным образом она проявляется в вертикальной стратификации верхнего 100-метрового слоя: в холодные периоды, такие как в 1980–90-х гг. и в конце 1920-х – начале 1930-х гг., вертикальная устойчивость в слое уменьшается за счет «выравнивания» вертикального профиля солёности (в сезонном пикноклине 0–20 м возрастает за счет термической устойчивости). О влиянии зимней конвекции на горизонтальные градиенты плотности столь определенно утверждать нельзя, они слабо коррелированы. Если оценивать только вклад понижения температуры (при фиксированном распределении солёности),

то даже при значительном охлаждении ХПС перепад плотности и интенсивность геострофической циркуляции изменяются незначительно (уменьшаются). Учесть изменение поля солёности, связанного с конвекцией, достаточно трудно, как при моделировании, так и при анализе натуральных данных, в последнем случае из-за сложности с определением вклада других факторов, в частности, водного баланса.

Следует отметить, что обеспеченность океанографическими данными крайне неравномерна во времени: в 1920-е гг., в конце 1940-х – начале 1950-х гг. и после 1998 г. количество гидрологических станций, выполненных в Черном море, значительно уменьшается. Особенность современного периода состоит в том, что основная информация из открытой части моря – это данные профилирующих буев ARGO, у которых датчики электропроводности воды часто нестабильны во времени и требуют корректировки (достаточно субъективной). Поэтому наиболее достоверные оценки рассматриваемых характеристик относятся к периоду от середины 1950-х гг. до середины 1990-х гг.

Выводы. Вертикальная стратификация плотности в верхнем слое Черного моря (0 – 100 м) усиливается в периоды пониженной солёности поверхностного слоя: до середины 1950-х гг. и после 1980 г., что связано с положительными фазами баланса пресных вод. Интенсивное конвективное перемешивание в периоды с несколькими холодными зимами подряд: с середины 1980-х до середины 1990-х гг. и с конца 1920-х до начала 1930-х гг., уменьшает вертикальную стратификацию. В слое глубже 100 м прослеживается длительная тенденция к ослаблению вертикальной устойчивости вод, что связано с формированием более однородной водной массы при общем потеплении и осолонении основного пикноклина.

Горизонтальные градиенты плотности и интенсивность геострофической циркуляции увеличиваются в относительно пресные периоды и уменьшаются при осолонении поверхностного слоя. Вторым по значимости внешним фактором является ротор касательного напряжения приводного ветра, который может преобладать над ролью водного баланса, как было при усилении циркуляции в конце 1960-х – начале 1970-х гг. Разнонаправленные тенденции в поверхностном и глубинном слоях моря, в отличие от вертикальной стратификации, не выявлены.

Одной из перспектив дальнейших исследований в данном направлении является выявление изменений термохалинной структуры моря в современный период. В условиях снижения индекса Северо-Атлантического колебания, начавшегося с середины 1990-х гг., следует ожидать крупномасштабных изменений ветровых условий и водного баланса и, соответственно, новой фазы гидрологического режима моря.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность чл.-корр. НАН Украины А.Б.Полонскому и Г.К.Коротаеву за консультации и плодотворные научные дискуссии.

Список литературы

1. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Долговременная изменчивость температуры и солёности в Черном море и ее причины // Доп. НАНУ – 2013. – № 1.–С.105-110.
2. Суворов А.М., Халиулин А.Х., Годин Е.А. О долгопериодных изменениях положения верхней границы сероводородной зоны Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 2. – С.62-70.
3. Полонский А.Б., Ловенкова Е.А. Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // Изв. РАН. ФАО. – 2006. – Т. 42, № 3. – С.419-430.
4. Белокопытов В.Н., Шокурова И.Г. Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солёности в Черном море в период 1951–1995 гг. // Экологическая

безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005, Вып. 12. – С.12-21.

5. Шокурова И.Г. Долгопериодная изменчивость гидрологических полей и геострофической циркуляции в Черном море // Автореф. дис. канд. географ. наук: 11.00.08. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 23 с.

6. Суворов А.М., Шокурова И.Г. Годовая и десятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 2. – С.29-41.

7. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Десятилетняя изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 4. – С.75-92.

8. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Моисеенко В.А., Кубряков А.И., Белокопытов В.Н., Инюшина Н.В. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47, № 3. – С.433-446.

9. Дорофеев В.Л. Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 6. – С.71-81.

10. Ильин Ю.П. Сезонные и межгодовые изменения динамических высот и их уклонов на стандартных разрезах через Основное Черноморское течение особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008, Вып.14. – С.244-257.

11. В.Н. Белокопытов. О методе восстановления термохалинной структуры Черного моря на основе эмпирических ортогональных функций // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012, Вып.17. – С.94-99.

12. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data // Ocean Sci. – 2011. – 7. – P.745-753.

Кліматична мінливість структури густини в Чорному морі.

Белокопытов В.М.

На основі реаналізу даних океанографічних спостережень виявлені загальні тенденції довготривалих змін структури густини Чорного моря в ХХ столітті. Розглядається характер низькочастотної мінливості вертикальної стратифікації, горизонтальних градієнтів густини і інтенсивності геострофічної циркуляції для різних шарів моря. Обговорюються зовнішні чинники, що впливають на структуру густини моря і їх відносна роль.

Ключові слова: густина води, стратифікація, циркуляція моря, кліматична мінливість, Чорне море.

Climatic variability of the Black Sea density structure.

Belokopytov V.N.

The general tendencies of long-term changes of the Black Sea density structure in the 20-th century are revealed on the basis of oceanographic data re-analysis. Low-frequency variability of vertical stratification, horizontal density gradients and geostrophic circulation intensity is considered. External forcings exerted on the density structure and its significance are discussed.

Keywords: water density, stratification, sea circulation, climatic variability, Black Sea.