

В. Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

О КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

На основе реанализа данных океанографических наблюдений выявлены общие тенденции долговременных изменений термохалинной структуры Черного моря. Обсуждается различный характер низкочастотной изменчивости для поверхностного и глубинного слоев. Предложена схема последовательности фаз гидрологического режима Черного моря в XX в.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *термохалинная структура, климатическая изменчивость, Черное море.*

Введение. Исследования климатических изменений – одно из наиболее приоритетных направлений в науках о Земле. Основное внимание традиционно уделяется климату атмосферы, но в последнее время возрастает количество работ, посвященное многолетней изменчивости Мирового океана и его отдельных морей.

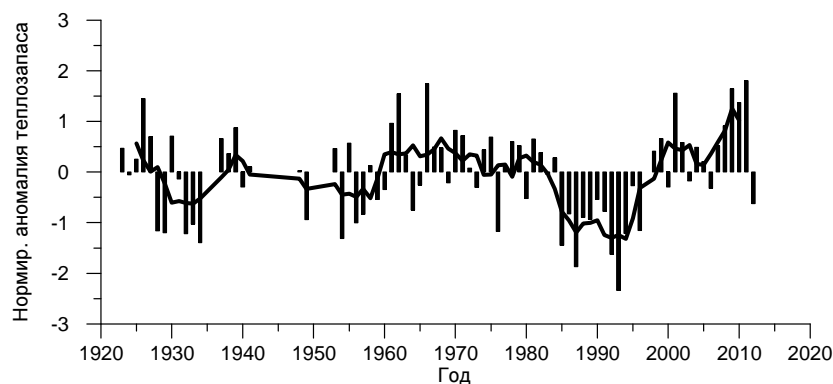
Для Черного моря, исследования межгодовой изменчивости и долгопериодных тенденций температуры и солености ведутся с 80-х гг. [1 – 7]. Цель данной работы – выявить общие характеристики климатической изменчивости гидрологического режима Черного моря для всего периода океанографических наблюдений, начиная с 20-х гг.

Данные наблюдений и методы исследования. Основным материалом послужили океанографические съемки (1923 – 2012 гг.), для современного периода – буи-профилемеры (2002 – 2012 гг.) и дрейфтеры (2000 – 2010 гг.). Также использовались спутниковые данные о температуре поверхности моря (1985 – 2012 гг.) и данные береговых гидрометстанций (наиболее длинный ряд с 1900 г.).

Для интегральных оценок на основе регулярных в пространстве термохалинных полей использовались два реанализа по гидродинамическим моделям для периодов 1971 – 1993 гг. [8], 1992 – 2002 гг. [9] и статистический ЭОФ реанализ термохалинных полей для 1923 – 2012 гг. [10].

Анализ результатов. Общий характер изменений теплозапаса Черного моря (для всего объема вод) за имеющийся 100-летний период наблюдений представляет собой циклический процесс без явно выраженного тренда (рис.1). Выделяются два холодных периода: с середины 20-х до конца 50-х гг. и с начала 80-х до конца 90-х гг., и два теплых периода: 1960 – 1980 гг. и современный этап, начавшийся в конце 90-х гг.

Такой характер колебаний, типичный для междесятилетней изменчивости, в целом не соответствует последним оценкам изменений теплозапаса Мирового океана [11], свидетельствующим об устойчивом положительном тренде для периода 1955 – 2010 гг. Если рассматривать только современный период резкого потепления (последние 30 лет), то оценка положительного



Р и с . 1 . Нормированные среднегодовые аномалии теплозапаса Черного моря относительно периода 1961 – 1990 гг. Сплошная линия отображает 5-летнее скользящее среднее.

тренда для Черного моря $0,39 \pm 0,05 \text{ Wm}^{-2}$ ($0,015 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) будет соответствовать оценкам для Мирового океана $0,33 - 0,66 \text{ Wm}^{-2}$ [11 – 13] для столба воды 0 – 2000 м.

Отличительной особенностью Черного моря следует считать различный характер низкочастотной изменчивости в верхнем 50-метровом и более глубоком слоях воды. Если в верхнем слое моря хорошо выражены междесятилетние колебания температуры, то в глубинном слое выявлено слабое, но устойчивое нагревание. Положительный тренд для всего исследуемого 100-летнего периода прослеживается с глубины 50 м, его оценки становятся статистически значимыми, начиная с горизонта 100 м. Скорость общего нагрева толщи воды резко падает с глубиной, глубже 300 м положительный тренд температуры очень мал. Вклад слоя глубже 50 м в общее изменение теплозапаса составляет в Черном море всего около 5 %, в то время как для океана [11] слой 700 – 2000 м дает около 30 %. Поэтому многолетняя изменчивость теплозапаса вод Черного моря определяется достаточно тонким верхним слоем, причем знаки тренда в поверхностном и глубинном слоях могут быть противоположны. Для океана тенденции для поверхностного и глубинного слоев более согласованы и не столь отличаются количественно.

Интенсивность зимней конвекции играет ведущую роль в низкочастотной изменчивости теплозапаса моря, т.к. аномалии ХПС прослеживаются почти во всем слое постоянного пикноклина. Наиболее выраженные минимумы теплозапаса, такие как в 80 – 90-х гг. и в конце 20-х – начале 30-х гг., возникают после того как несколько холодных зим следуют друг за другом. ХПС при этом играет роль долговременного «хранителя» зимних отрицательных аномалий температуры поверхности моря. Аномалии теплого периода года формируются в верхнем 20-метровом слое над термоклином и влияют, в основном, на сезонную изменчивость.

Общее изменение солености Черного моря можно охарактеризовать как устойчивое осолонение всего объема вод (рис.2) со скоростью $7,58 \pm 1,06 \text{ кг м}^{-2}/10 \text{ лет}$ ($0,0038 \text{ PSU}/10 \text{ лет}$). Как и в случае термической структуры моря, тенденции изменения солености различны для поверхностного и глубинного слоев. В отличие от температуры, где изменчивость слоя 0 – 50 м

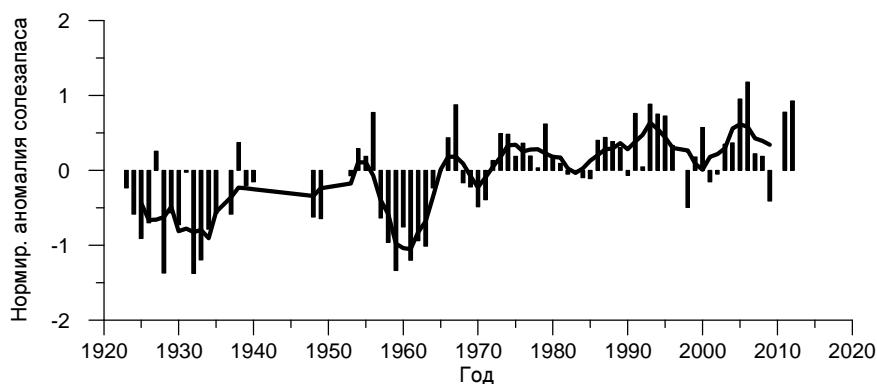


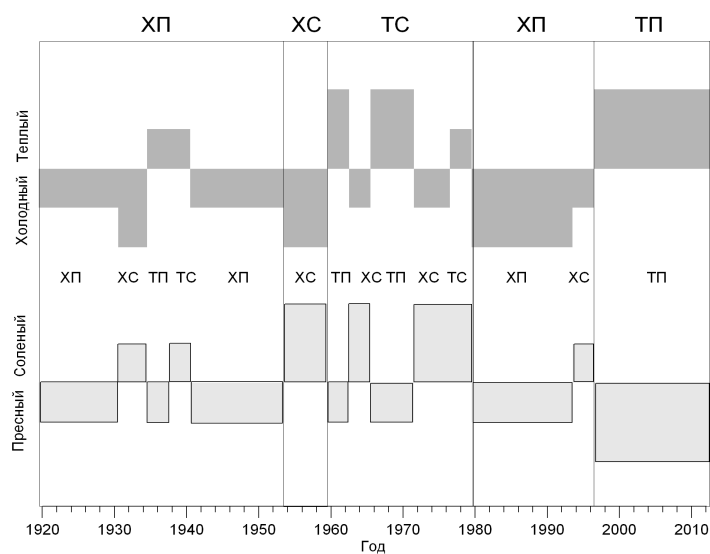
Рис. 2. Нормированные среднегодовые аномалии солености Черного моря относительно периода 1961 – 1990 гг. Сплошная линия отображает 5-летнее скользящее среднее.

является определяющей для общего теплозапаса моря, основные изменения солености сосредоточены в более глубоких слоях, большей частью в постоянном галоклине.

Колебания солености верхнего слоя 0 – 50 м, хотя и не являются определяющими для общего солености моря, оказывают сильное влияние на пространственную структуру плотности, вертикальный обмен и интенсивность циркуляции. В целом, верхний слой моря был относительно пресным в период 1920 – 1954 гг., соленым в 1954 – 1980 гг. и снова пресным, начиная с 80-х гг. Соответственно, в пресную фазу – до 1954 г. и после 1980 г. усиливается вертикальная стратификация, обостряются горизонтальные градиенты плотности и интенсифицируется циркуляция моря. Положительная тенденция кинетической энергии циркуляции моря в последние 30 лет, существующая вопреки отрицательной тенденции завихренности ветра, также говорит в пользу термohалинных факторов.

Если рассматривать многолетние колебания температуры и солености совместно, то можно увидеть, что в верхнем слое 0 – 50 м происходит чередование потеплений/похолоданий, осолонений/распреснений с различными временными периодами, в частности, современный период характеризуется значительным потеплением и опреснением. Сочетания различных фаз колебаний температуры и солености можно рассматривать как фазы гидрологического режима моря. Временную последовательность таких состояний (фаз) можно разбить на отдельные периоды следующим образом (рис.3): холодный и пресный в 1920 – 1954 гг., холодный и соленый в 1954 – 1960 гг., теплый и соленый в 1960 – 1980 гг., холодный и пресный в 1980 – 1996 гг., теплый и пресный, начиная с 1996 г. При более высокочастотном процессе смены гидрологического режима, продолжительность фаз уменьшается до 1 – 3 лет. Во время теплого и соленого (в целом) периода 1960 – 1980 гг. интенсивность такого процесса была максимальной.

Увеличение солености в слое 0 – 2000 м и теплозапаса в слое 100 – 2000 м говорит о продолжающемся увеличении объема мраморноморских вод и отсутствии общего баланса соли. Положительный тренд солености и температуры в пикноклине, который был выявлен достаточно давно, чаще



Р и с . 3 . Общая схема чередования фаз гидрологического режима Черного моря. Обозначения: Т – теплый, Х – холодный, П – пресный, С – соленый; высота столбиков отображает относительную интенсивность в 2-х градациях: умеренной и сильной.

всего объясняется увеличением интенсивности циркуляции и, соответственно, поднятием галоклина в центральной части моря. Другое объяснение состоит в том, что соль будет накапливаться в галоклине при уменьшении скорости вертикального турбулентного обмена, вызванного распреснением верхнего слоя [2, 14]. Однако, эти гипотезы могут объяснить только перераспределение соли в пространстве, но не изменение общего солезапаса моря.

Выводы. В Черном море на протяжении последних 100 лет происходит устойчивое увеличение тепло и солезапаса в слое 100 – 2000 м, что говорит о продолжающемся увеличении объема мраморноморских вод.

В верхнем слое 0 – 50 м происходит чередование фаз гидрологического режима моря с различными временными периодами, современное состояние (с конца 90-х гг.) характеризуется значительным потеплением и опреснением.

В периоды с низкой соленостью поверхностного слоя – до 1954 г. и после 1980 г. – усиливается вертикальная стратификация, обостряются горизонтальные градиенты плотности и интенсифицируется циркуляция моря.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
2. Гертман И.Ф. Термохалинная структура вод моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / Под ред. Симонова А.И., Альтмана Э.Н. Т.4. Черное

- море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– СПб: Гидрометеиздат, 1991.– С.146-195.
3. *Титов В.Б.* Влияние многолетней изменчивости климатических условий на гидрологическую структуру и межгодовое обновление холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология.*– 2003.– т.43, № 2.– С.176-184.
 4. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Долговременные тенденции в изменчивости глубоководных термохалинных характеристик Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 2006.– № 4.– С.18-30.
 5. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.*– 2006.– т.42, № 3.– С.419-430.
 6. *Шокурова И.Г.* Долгопериодная изменчивость гидрологических полей и географической циркуляции в Черном море: Автореферат дис. ... канд. географ. наук.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010.– 23 с.
 7. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Долговременная изменчивость температуры и солёности в Черном море и ее причины // *Доп. НАНУ.*– 2013.– № 1.– С.105-110.
 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. *Белокопытов В.Н.* 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.
 11. *Levitus S. et al.* World ocean heat content and thermosteric sea level change (0 – 2000 m), 1955 – 2010 // *Geophys. Res. Lett.*– 2012.– 39.– L10603. doi:10.1029/2012GL051106.
 12. *Ishii M., Kimoto M., Sakamoto K., Iwasaki S.I.* Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses // *J. Oceanogr.*– 2006.– 62(2).– P.155-170.
 13. *Willis J.K., Roemmich D., Cornuelle B.* Interannual variability in upper-ocean heat content, temperature and thermosteric expansion on global scales // *J. Geophys. Res.*– 109.– C12036. doi:10.1029/2003JC002260.
 14. *Богуславский С.Г., Котовицкий Б.Б.* Формирование современного поля солёности Черного моря // *Океанология.*– 1984.– т.24, № 3.– С.410-416.

Материал поступил в редакцию 16.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ На основі реаналізу даних океанографічних спостережень виявлені загальні тенденції довготривалих змін термохалінної структури Чорного моря. Обговорюється різний характер низькочастотної мінливості для поверхневого і глибинного шарів. Запропонована схема послідовності фаз гідрологічного режиму Чорного моря в ХХ ст.

ABSTRACT The general tendencies of long-term changes of the Black Sea thermohaline structure are revealed on the basis of oceanographic data reanalysis. Different types of low-frequency variability for surface and deep layers are discussed. The outline of the Black Sea hydrological regime mode sequence in 20-th century is suggested.