

## Долговременная изменчивость температуры и солености в Черном море и ее причины

*На основании обработки архивных гидрологических данных изучены долговременные изменения температуры и солености в Черном море с середины прошлого столетия и по настоящее время. Показано, что в деятельном слое моря (от поверхности до нижней границы холодного промежуточного слоя) изменчивость температуры характеризуется низкочастотными колебаниями с периодом ~60 лет. Во временном ходе солености верхнего слоя на фоне отрицательного тренда выделяются колебания с периодом ~20–30 лет. На глубинах >50–100 м температура, и соленость характеризуются положительным трендом. Анализируются вероятные причины обнаруженных закономерностей в изменчивости температуры и солености Черного моря.*

Выявление и анализ причин многолетней изменчивости характеристик морской среды в связи с крупномасштабными процессами в системе океан — атмосфера является одной из наиболее актуальных проблем, связанных с глобальными и региональными изменениями климата [1]. Черное море имеет небольшие размеры и ограниченный водообмен с Мировым океаном. Положительный пресный баланс (превышение стока рек и осадков над испарением) и приток высокосоленых мраморноморских вод через прол. Босфор обуславливают резкую стратификацию вод Черного моря и ослабленное вертикальное перемешивание в слое основного пикноклина. Поэтому изменения внешних климатических факторов (потоков тепла и импульса на поверхности моря, стоков рек, осадков и испарения) приводят к значимому отклику морской среды, более выраженному (особенно в верхнем слое моря), чем в большинстве других районов Мирового океана [2].

Вопросам выявления и анализа причин долговременных изменений термохалинных полей Черного моря посвящено достаточно большое число работ [2–8]. Однако продолжающееся накопление гидрологических данных позволяет регулярно пересматривать представления о характере долговременной изменчивости температуры и солености вод. Так, например, если в конце прошлого и начале настоящего столетия многие работы были посвящены анализу причин выхолаживания верхнего слоя моря, наблюдавшегося с конца 1960 до 1990-х гг. [4, 5], то работы, выполненные на основе данных последних десятилетий, уже показывают наличие положительной тенденции в изменчивости температуры поверхностных вод [7]. Таким образом, увеличение продолжительности рядов измерений позволяет не только существенно уточнить оценки долговременных изменений гидрологических полей в Черном море, но и получить принципиально новые результаты.

Целью настоящей работы является получение новых представлений о долговременной изменчивости температуры и солености вод в слое 0–300 м в период с середины прошлого столетия по настоящее время с использованием наиболее полной региональной базы гидрологических данных и анализ возможных причин обнаруженных изменений.

В работе использовались судовые данные о температуре и солености (с 1951 г. по настоящее время) и измерения температуры дрейфтерами (за 2000–2007 гг.) из Банка данных

Морского гидрофизического института НАН Украины [9, 10]; данные измерений температуры и солёности глубоководными буями-профилемерами ARGO (за 2005–2008 гг.) [11], среднемесячные спутниковые данные по температуре поверхности моря (ТПМ) с разрешением  $4 \times 4$  км, рассчитанные по ночным измерениям за 1985–2007 гг. [12].

Исходные данные по температуре и солёности, прошедшие предварительный контроль качества, группировались за десятилетние периоды времени с пятилетним сдвигом: 1951–1960 и 1956–1965 годы и так далее. Для построения полей температуры и солёности использовался метод оптимальной интерполяции Гандина [13]. В слое 0–50 м вычисления выполнялись для каждого горизонта с интервалом 10 м, далее на горизонтах, м: 75, 100, 120, 150, 200 и 300. Поскольку амплитуда сезонного хода в верхнем слое достаточно велика, анализ долговременной изменчивости здесь выполнен отдельно для двух сезонов: зимнего (февраль — март) и летнего (июль — август). Для слоя 75–300 м расчеты проводились по данным, объединенным за все сезоны. Количественные оценки характеристик временного хода температуры и солёности междесятилетнего масштаба выполнялись на основе анализа изменчивости осредненных по акватории моря значений термохалинных характеристик для каждого горизонта в отдельности.

Междесятилетняя изменчивость ТПМ имеет вид низкочастотных колебаний с периодом, близким к рассматриваемому временному интервалу (около 60 лет). Такой же квазипериодический характер носит и изменчивость температуры воздуха на береговых станциях в Севастополе и Ялте (рис. 1, *a–г*). Учитывая, что низкочастотная изменчивость ТПМ и температуры воздуха в Черном море хорошо согласуются между собой, можно обоснованно заключить, что существование выделенной периодичности подтверждается более продолжительными (вековыми) данными стандартных наблюдений на метеостанциях [14].

Для зимы и лета междесятилетние колебания ТПМ различаются по амплитудно-фазовым характеристикам (см. *в, г* на рис. 1). В летний сезон размах колебаний вдвое выше, чем в зимний. Если зимой он составляет  $\sim 1^\circ\text{C}$ , то летом достигает  $2^\circ\text{C}$ . Линейные тренды ТПМ незначимы.

В верхнем слое моря квазипериодический характер изменчивости отмечается и для солёности (см. *д, е* на рис. 1). Однако период колебаний у солёности меньше, чем у температуры, и составляет  $\sim 20$ – $30$  лет и для зимы, и для лета. На фоне квазипериодических изменений выделяется отрицательный линейный тренд, особенно хорошо выраженный летом (см. *е* на рис. 1; табл. 1). С увеличением глубины характер десятилетней изменчивости температуры и солёности изменяется. В пикноклине между горизонтами 50 и 75 м происходит смена

Таблица 1. Характеристики линейных трендов осредненной по акватории моря температуры и солёности в слое 20–300 м в период 1951–2008 гг.

Горизонт, м	Температура		Солёность	
	среднее значение, $^\circ\text{C}$	коэффициенты линейных трендов, $^\circ\text{C}/10$ лет	среднее значение, $\text{‰}$	коэффициенты линейных трендов, $\text{‰}/10$ лет
20 (зима)	7,180	–0,060	18,230	–0,032
20 (лето)	14,356	<b>–0,400</b>	18,124	<b>–0,060</b>
75	7,678	–0,030	19,329	<b>0,043</b>
100	8,055	0,018	20,008	<b>0,061</b>
200	8,659	<b>0,017</b>	21,322	<b>0,050</b>
300	8,806	<b>0,007</b>	21,711	<b>0,025</b>

Примечание. Статистически значимые (на 95% уровне) коэффициенты линейных трендов отмечены полужирным шрифтом.

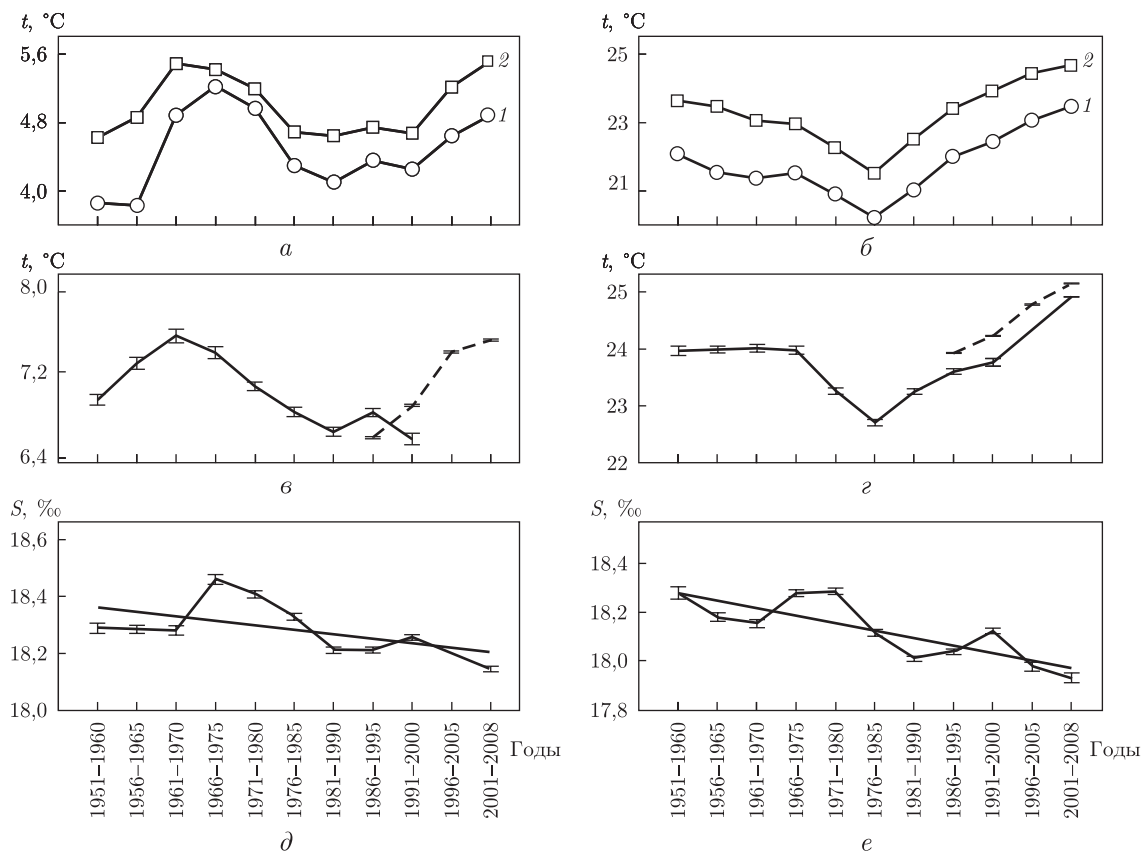


Рис. 1. Междесятилетняя изменчивость температуры воздуха в Севастополе (1) и Ялте (2) (а, б), средней по акватории моря ТПМ по данным контактных (сплошная кривая) и спутниковых (штриховая кривая) измерений (в, з), средних значений солёности на горизонте 20 м (д, е) в феврале — марте (а, в, д) и июле — августе (б, з, е)

знака тренда в изменчивости солёности (с отрицательного на положительный). Значимые (на 95% уровне) положительные тренды солёности получены в слое 75–300 м (см. табл. 1). Следует отметить, что этот тренд, главным образом, вызван резким увеличением солёности с начала 1960-х до середины 1970-х гг. (рис. 2).

По сравнению с солёностью отклик на долгопериодные изменения внешних факторов, действующих на поверхности, в междесятилетней изменчивости температуры прослеживается до более глубоких горизонтов (см. рис. 2). Положение максимумов и минимумов в междесятилетней изменчивости температуры на горизонте 100 м отражает изменения положения нижней границы холодного промежуточного слоя (ХПС) Чёрного моря. Температура менее 8 °С, отмечаемая здесь в 1980-е и начале 1990-х годов, указывает на то, что ХПС в это время проникал глубже 100 м. Начиная с горизонта 100 м и глубже, в изменчивости температуры появляются положительные тренды (см. табл. 1). Значимые на 95% уровне положительные линейные тренды температуры выделены в слое 150–300 м.

Полученные результаты показывают, что характер междесятилетней изменчивости температуры и солёности в верхнем слое моря и пикноклине различен. Это говорит о том, что определяющую роль в долговременной изменчивости термохалинных характеристик в разных слоях играют разные факторы. Действительно, изменчивость температуры и солёности

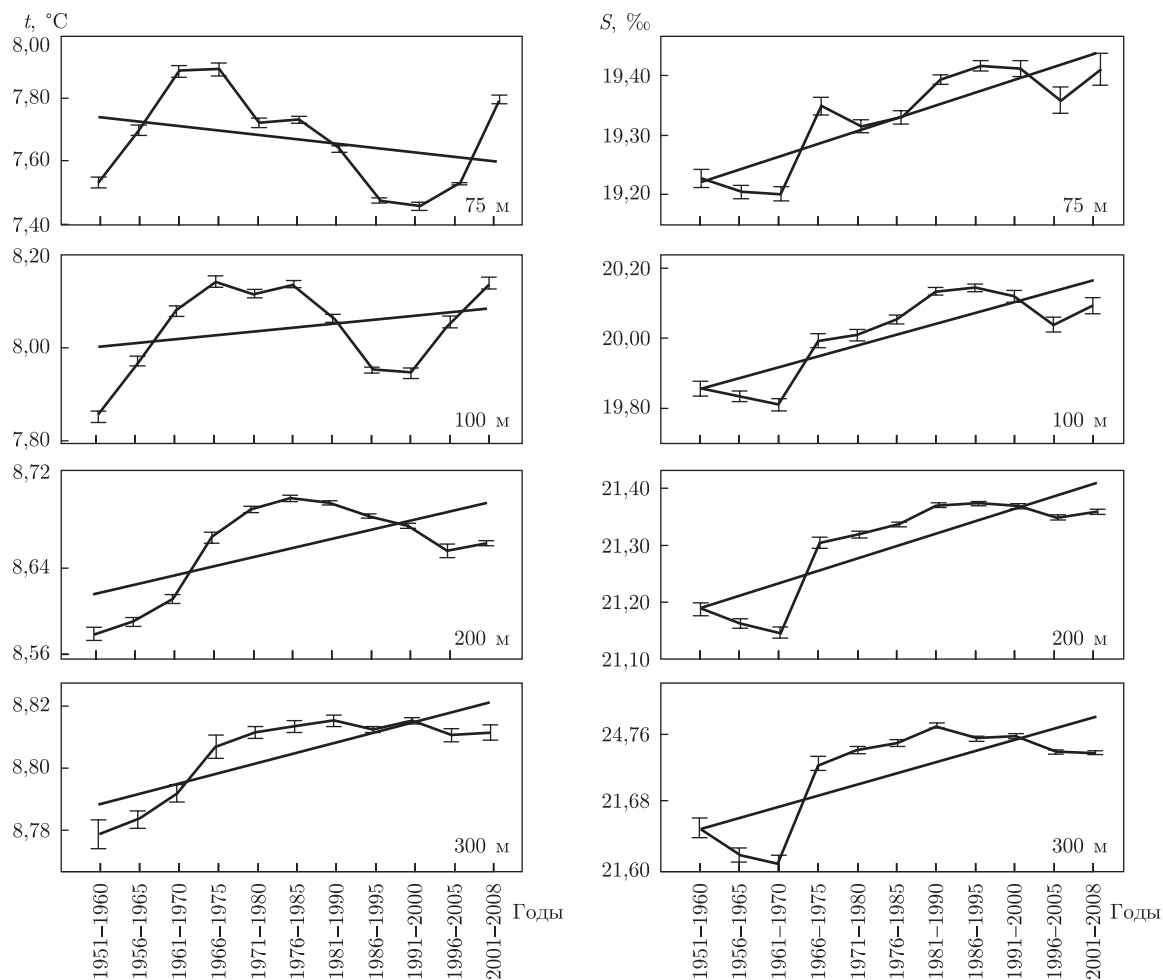


Рис. 2. Междесятилетняя изменчивость средней по акватории моря температуры и солёности на горизонтах, м: 75, 100, 200 и 300 по данным, осредненным за все сезоны (прямые линии — линейные тренды)

определяется совокупностью различных внешних и внутренних факторов, относительная роль которых изменяется в пространстве и во времени [2, 3].

Известно, что температура поверхностного слоя моря определяется теплообменом с атмосферой, динамикой вод (приводящей к более или менее активным процессам переноса тепла, включая вертикальную адвекцию, вызванную апвеллингами, и перемешиванию), а также адвекцией холодных речных вод в зимне-весенний период [2]. Период выявленных выше квазипериодических изменений температуры в верхнем слое моря, составляющий  $\sim 60$  лет, хорошо согласуется с периодичностью в изменчивости атмосферных полей в Черноморском регионе, обусловленной Атлантической мультидекадной осцилляцией. Причем, сезонные различия десятилетней изменчивости температуры воды объясняются зависимостью характеристик этой осцилляции от времени года (см. рис. 1; [1]).

На долговременную изменчивость солёности в верхнем слое моря в первую очередь влияют факторы, определяющие водно-солевой бюджет в море. К ним относятся сток рек, осадки, испарение, водообмен через проливы. Пресный баланс характеризуется положительным трендом в период с 1950-х гг. по настоящее время, на фоне которого выделяются

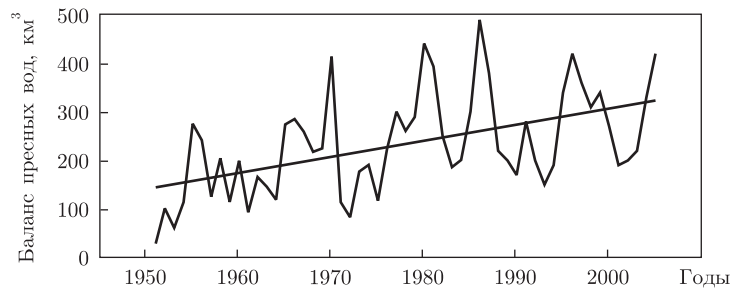


Рис. 3. Изменчивость среднегодовых величин баланса пресных вод Черного моря, по [15]

колебания десятилетнего масштаба (рис. 3; [15]). Именно это служит причиной отрицательной тенденции в изменчивости солености поверхностных вод и формирует низкочастотные колебания солености поверхностных вод, описанные выше.

Фазовое запаздывание в изменении термохалинных характеристик десятилетнего масштаба в основном пикноклине между более глубокими горизонтами и верхним пикноклином свидетельствует о наличии сигнала, распространяющегося снизу вверх. Это говорит о важности изменяющейся интенсивности притока мраморноморских вод для формирования наблюдающейся изменчивости температуры и солености вод пикноклина, на что было обращено внимание в статье [8]. Не исключено, что некоторый вклад в низкочастотную изменчивость температуры и солености в пикноклине вносят периодически интенсифицирующиеся (или ослабевающие) процессы перемешивания, обусловленные временной изменчивостью вертикальной стратификации вод Черного моря.

Таким образом, в результате выполненного исследования получено новое обобщенное представление о характере низкочастотной изменчивости температуры и солености верхнего 300-метрового слоя Черного моря и проанализированы наиболее вероятные ее причины.

1. Полонский А. Б. Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан–атмосфера, термохалинная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2008. – 45 с.
2. Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова и Э. И. Альтмана. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 430 с.
4. Еремеев В. Н., Ефимов В. В., Суворов А. М. и др. Аномальная климатическая тенденция изменения температуры Черного моря // Доп. НАН України. – 2001. – № 11. – С. 91–96.
5. Полонский А. Б., Ловенкова Е. А. Тренд температуры и солености деятельного слоя в Черном море во второй половине XX века и его возможные причины // Изв. РАН. ФАО. – 2004. – 40, № 6. – С. 832–841.
6. Белокопытов В. Н., Шокурова И. Г. Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солености в Черном море в период 1951–1995 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2005. – Вып. 12. – С. 12–21.
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Sea surface temperature variability // The Black Sea Environ. The Handbook of Environ. Chem. – 2008. – 5Q. – P. 255–275.
8. Полонский А. Б., Шокурова И. Г. Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и начале XXI столетий // Доп. НАН України. – 2011. – № 9. – С. 103–110.
9. Андрущенко Е. Г., Галковская Л. К., Годин Е. А. и др. Банк океанографических данных МГИ НАН Украины: Информационные ресурсы и доступ к данным. – Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2010. – 59 с.; <http://ocean.nodc.org.ua>.

10. Ратнер Ю. Б., Толстошеев А. П., Холод А. Л., Мотыжев С. В. Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // Мор. гидрофиз. журн. – 2009. – № 3. – С. 50–67.
11. <http://www.usgoda.gov/argo/argo.html>.
12. <http://poet.jpl.nasa.gov>.
13. Полонский А. Б., Шокурова И. Г. Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // Мор. гидрофиз. журн. – 2008. – № 1. – С. 51–65.
14. Ильин Ю. П., Репетин Л. Н. Вековые изменения температуры воздуха в Черноморском регионе и их сезонные особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – Вып. 14. – С. 433–448.
15. Ильин Ю. П., Репетин Л. Н. Климатические изменения гидрометеорологического режима северного и восточного побережий Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Вып. 25, № 1. – С. 157–168.

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 23.05.2012

Член-корреспондент НАН України **О. Б. Полонський, І. Г. Шокурова**

### **Довгочасна мінливість температури і солоності в Чорному морі та її причини**

*На підставі обробки архівних гідрологічних даних вивчено довгочасні зміни температури й солоності в Чорному морі з середини минулого століття і по теперішній час. Показано, що в діяльному шарі моря (від поверхні до нижньої межі холодного проміжного шару) мінливість температури характеризується низькочастотними коливаннями з періодом ~60 років. У часовому ході солоності верхнього шару на фоні негативного тренда виділяються коливання з періодом ~20–30 років. На глибинах >50–100 м і температура, і солоність характеризуються позитивним трендом. Аналізуються вірогідні причини виявлених закономірностей в мінливості температури й солоності Чорного моря.*

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky, I. G. Shokurova**

### **Long-term variability of temperature and salinity in the Black Sea and its causes**

*Long-time changes in temperature and salinity in the Black Sea from the middle of the last century to the present time are studied on the basis of the processing of hydrological data. It is shown that, in the active layer of the sea (from the surface to the low boundary of the cold intermediate layer), the variability of temperature is characterized by low-frequency oscillations with a period of about 60 years. Variations of 20–30 years superimposed on a negative trend are observed in the variability of salinity in the upper layer. At the depths >50–100 m, the temperature and salinity are characterized by a positive trend. The likely causes of the observed variability of temperature and salinity of the Black Sea are analyzed.*