

А.Б. Полонский, Е.А. Ловенкова

Долговременные тенденции в изменчивости глубоководных термохалинных характеристик Черного моря

По архивным гидрологическим данным за 1955 – 1998 гг. анализируются тренды глубоководных термохалинных характеристик Черного моря, а также их межгодовая и десятилетняя изменчивость. Выявлено повышение солёности глубже 1000 м в западной части моря между серединой 50-х и началом 80-х годов и противоположная тенденция в следующие 15 – 20 лет. Средняя скорость роста глубоководной солёности между 1960 и 1980 гг. и её уменьшения с начала 80-х годов составляет 0,05‰/20 лет. Это свидетельствует об интенсификации водообмена через Босфор в первые 25 лет анализируемого периода и о его ослаблении в последующие 20 лет. На фоне параболического тренда выделяются межгодовая изменчивость с типичным периодом 6,5 года и квазидвадцатилетняя периодичность.

Введение. Накопленные к настоящему времени данные наблюдений не дают возможности достаточно полно описать пространственно-временную изменчивость крупномасштабных глубоководных характеристик температуры и солёности Черного моря. На горизонтах с глубинами, превышающими 500 м, даже среднемноголетнее пространственное распределение температуры и солёности слабо изучено [1 – 5]. Так например, по данным работы [2], в центральной глубоководной котловине формируются две замкнутые области повышенных значений солёности, что противоречит большинству ранее опубликованных результатов [5, 6].

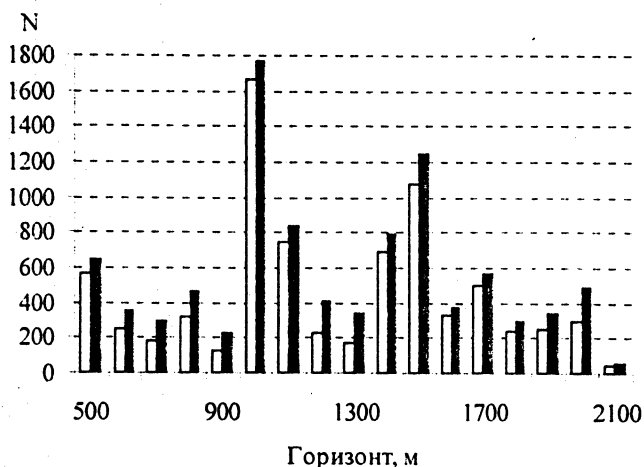
Долговременные тенденции изменений термохалинных характеристик глубже 500 м практически не изучены. Это объясняется не только небольшим количеством наблюдений и их невысоким качеством, но и малой изменчивостью глубоководных характеристик [5, 6]. Поэтому в ряде работ рассматривается изменчивость глубоководных характеристик в отдельных частях моря и за отдельные периоды [7, 8]. Причем в различных работах используются данные наблюдений за разные периоды, что не позволяет получить целостное описание изменчивости глубоководных черноморских характеристик на основных временных масштабах. Тенденции, обнаруженные в разных работах, по-видимому, в значительной степени обусловлены наличием квазипериодической изменчивости десятилетнего масштаба. Это хорошо видно по временному ходу термохалинных характеристик на более мелководных горизонтах, лучше обеспеченных данными наблюдений [2, 9]. Следует также учесть, что разные авторы пользуются различными процедурами обработки экспериментальных данных. В первую очередь это относится к пространственно-временному сглаживанию, что, в частности, приводит к эффектам, которые можно проиллюстрировать на следующем примере. Черное море характеризуется наличием значительных пространственных неоднородностей термохалинных характеристик. Большая часть гидрологических наблюдений выполняется в одни периоды в западной, а в другие — в восточной части моря. Это приводит к завышению или занижению величин температуры и солёности в одной

© А.Б. Полонский, Е.А. Ловенкова, 2006

из частей Черного моря, оцененных по всем данным без учета их пространственно-временной структуры, и, следовательно, к фиктивной низкочастотной изменчивости. Между тем изменчивость T , S -характеристик в глубоководных слоях Черного моря может служить индикатором интенсивности поступления мраморноморских вод через пролив Босфор, т. е. интенсивности термохалинной циркуляции в море.

Таким образом, для анализа пространственно-временной изменчивости глубоководных характеристик температуры и солености Черного моря по архивным данным необходимо вначале провести анализ распределения данных за весь период наблюдений по акватории моря. Только после этого можно переходить к анализу временной изменчивости термохалинных характеристик для отдельных частей моря. Такой анализ для западной и восточной частей Черного моря и является целью настоящей работы.

Характеристика использованного материала и методика его обработки. Для расчета среднемноголетних значений солености и температуры глубинных и придонных слоев Черного моря (в диапазоне глубин от 500 до 2000 м) и анализа их изменчивости использовались материалы экспедиционных наблюдений за период 1890 – 1998 гг. Подавляющее число наблюдений было выполнено с 1955 по 1998 гг. [6]. Поэтому в дальнейшем мы ограничились анализом именно этого периода времени. Общее число наблюдений в рассматриваемом слое составило 17126. Из них в западной части моря было выполнено 7637 измерений, а в восточной — 9491. Распределение числа наблюдений по горизонтам и для отдельных месяцев приведено в табл. 1. Видно, что наибольшее число данных отмечается в сентябре, причем наиболее обеспечен наблюдениями горизонт 1000 м. Глубже их количество в целом снижается. Отмечается вместе с тем существенный рост количества наблюдений на горизонтах 1500, 1700 и 2000 м. по сравнению с близлежащими горизонтами (рис. 1).



Р и с. 1. Общее число гидрологических наблюдений (N), использованных для анализа, в западной (незачерненные прямоугольники) и восточной (зачерненные прямоугольники) частях Черного моря

Общее и ежемесячное число гидрологических наблюдений (N) в Черном море на стандартных горизонтах для западной и восточной частей ($N_{\text{зап}}$, $N_{\text{вост}}$)

Горизонт, м	N	$N_{\text{зап}}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
		$N_{\text{вост}}$												
500	1206	562	17	54	40	46	49	18	57	54	94	40	55	38
		644	5	77	36	42	71	25	42	37	114	86	83	26
600	595	245	3	20	23	36	24	0	61	2	58	15	0	3
		350	0	34	39	21	40	0	51	18	70	53	22	2
700	480	186	3	20	23	29	24	0	18	0	58	8	0	3
		294	0	34	39	3	40	0	28	4	73	49	22	2
800	774	315	4	28	25	59	24	0	67	3	68	18	14	5
		459	3	38	39	45	40	0	59	18	84	94	37	2
900	349	123	9	16	5	9	18	1	23	2	28	1	6	5
		226	23	30	19	6	32	6	31	2	70	2	1	4
1000	3427	1663	26	82	137	242	138	98	180	104	218	146	157	135
		1764	5	136	102	156	129	98	178	111	312	281	163	93
1100	1584	743	19	74	41	111	53	9	83	63	73	41	112	64
		841	11	126	42	75	78	10	68	49	130	86	106	60
1200	633	229	2	25	30	30	27	0	28	10	38	10	26	3
		405	1	38	35	47	39	4	50	15	75	54	45	2
1300	507	166	2	22	20	25	14	0	25	3	34	9	10	2
		342	0	37	31	37	36	0	50	12	71	48	18	2
1400	1483	687	16	65	43	101	48	25	67	55	64	38	114	51
		796	8	112	34	81	73	25	63	48	118	75	101	58
1500	2329	1080	20	65	61	171	89	52	88	73	132	96	134	99
		1249	2	108	53	126	96	65	106	71	195	169	157	101
1600	700	327	0	22	14	77	27	0	44	18	36	16	44	29
		373	0	33	29	36	23	2	40	18	79	26	50	37
1700	1056	493	12	47	22	76	37	19	46	43	50	29	77	35
		563	2	86	28	44	47	18	47	27	95	42	79	48
1800	530	235	0	19	14	42	17	0	29	24	28	13	30	20
		295	0	21	21	26	21	2	29	18	72	16	38	32
1900	589	249	8	28	13	39	22	3	28	18	33	10	29	18
		340	2	46	20	15	36	0	31	23	68	18	52	29
2000	782	290	5	19	15	34	22	19	24	21	42	39	30	20
		492	2	32	23	42	24	22	47	31	86	68	57	58
2100	102	44	0	0	5	6	1	6	4	4	3	3	9	3
		58	0	1	0	3	0	7	3	1	5	20	12	6

Для изучения низкочастотной изменчивости термохалинных характеристик Черного моря проводились расчеты среднегодовых значений температуры и солености в диапазоне глубин 500 – 2000 м с дискретностью 100 м отдельно для западной и восточной частей моря. Разделение акватории на западную и восточную производилось по меридиану 34° в. д. Это было сделано по двум причинам. Во-первых, 34° в. д. делит глубоководную часть моря приблизительно на две равные части, одна из которых примыкает к Босфору, являющемуся источником глубинных вод, а вторая удалена от него. Во-вторых, данные наблюдений в среднем за год распределены достаточно равномерно между этими двумя частями моря (рис. 1, табл. 1). Для анализа сезонных изменений в рассматриваемом слое данных наблюдений недостаточно, особенно в западной части моря. Можно лишь произвести грубую их оценку для отдельных горизонтов, что будет сделано в отдельной работе. При анализе среднегодовых величин учитывался тот факт, что распределение данных по площади моря достаточно равномерное. Это позволило произвести их простое арифметическое осреднение и сравнивать в дальнейшем статистические характеристики температуры и солености для обеих частей моря.

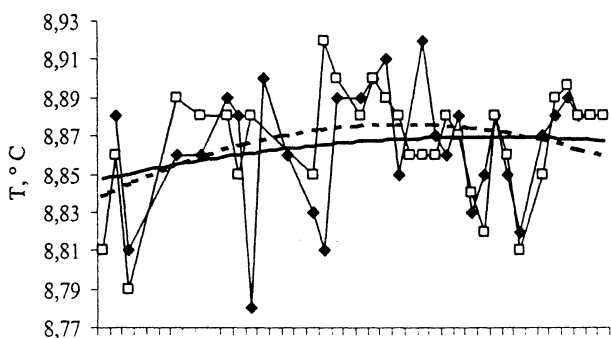
Кроме стандартных статистических характеристик рассчитывались линейные и параболические тренды по температуре и солености для каждого горизонта. После удаления линейных трендов производилось разложение соответствующих двумерных функций (зависящих от глубины и времени) на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) и изучались статистические и спектральные свойства временных коэффициентов первых мод ($AT_1(t)$ и $AS_1(t)$), вносящих основную долю в суммарную дисперсию температуры и солености. Причем разложение на ЭОФ производилось для периода времени с 1970 по 1998 гг., наиболее полно обеспеченного наблюдениями. Цель анализа заключалась в выделении основных временных масштабов реальной климатической изменчивости. При этом сам метод ЭОФ использовался главным образом как инструмент фильтрации шумов разного типа, затрудняющих анализ естественной низкочастотной изменчивости.

Результаты, их анализ и обсуждение. Из табл. 2 видно, что средние температура и соленость на стандартных горизонтах в западной и восточной частях моря отличаются незначительно. Эти отличия много меньше величины стандартных отклонений в обеих частях моря. Отметим вместе с тем, что в среднем для всех горизонтов в западной части моря температура выше приблизительно на $0,002^\circ\text{C}$, а средняя разность между значениями солености в западной и восточной частях моря составляет $0,015\%$, достигая $0,08\%$ на горизонте 600 м. Таким образом, несмотря на то, что анализируемые разности меньше величины стандартных отклонений и для температуры и для солености, табл. 2 явно указывает на тот очевидный факт, что в среднем глубинные и придонные воды в западной части моря не только несколько теплее, чем в восточной, но и существенно солонее. Этот результат является вполне естественным следствием поступления более соленых и более теплых мраморно-морских вод именно в западную часть Черного моря через пролив Босфор.

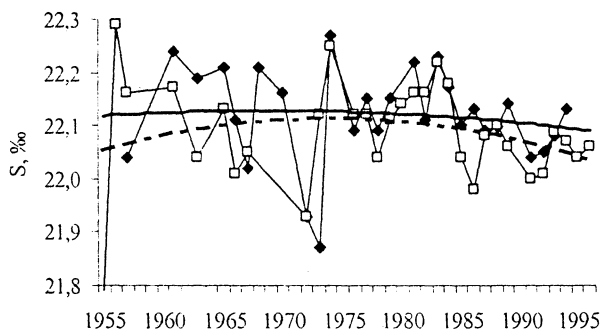
Среднее значение, среднеквадратичное отклонение σ и экстремальные характеристики температуры и солёности воды в Черном море на стандартных глубоководных горизонтах

Гори- зонг, м	$T_{\text{зан}}$				$T_{\text{вост}}$				$S_{\text{зан}}$				$S_{\text{вост}}$			
	среднее	σ	max	min	среднее	σ	max	min	среднее	σ	max	min	среднее	σ	max	min
500	8,865	0,030	8,920	8,780	8,867	0,026	8,920	8,790	22,120	0,218	22,270	21,870	22,090	0,281	22,290	21,790
600	8,872	0,009	8,905	8,808	8,862	0,020	8,902	8,777	22,190	0,266	22,610	22,050	22,110	0,196	22,290	21,790
700	8,890	0,006	8,920	8,830	8,890	0,006	8,910	8,830	22,190	0,009	22,260	22,150	22,140	0,059	22,240	21,970
800	8,908	0,014	8,940	8,837	8,900	0,029	8,942	8,773	22,250	0,315	22,720	22,050	22,230	0,114	22,340	22,010
900	8,934	0,014	9,010	8,900	8,939	0,019	9,050	8,904	22,290	0,043	22,470	22,230	22,250	0,066	22,290	22,100
1000	8,944	0,007	8,975	8,912	8,939	0,013	8,974	8,895	22,290	0,034	22,330	22,230	22,290	0,027	22,410	22,220
1100	8,957	0,029	9,010	8,850	8,951	0,020	8,992	8,891	22,320	0,404	22,610	22,100	22,330	0,173	22,850	22,100
1200	8,966	0,030	9,020	8,860	8,961	0,017	9,005	8,902	22,320	0,386	22,610	22,100	22,330	0,164	22,850	22,100
1300	8,983	0,027	9,026	8,864	8,984	0,016	9,023	8,920	22,340	0,011	22,610	22,280	22,320	0,013	22,360	22,250
1400	9,002	0,030	9,051	8,872	9,000	0,025	9,043	8,932	22,340	0,060	22,610	22,150	22,330	0,064	22,410	22,210
1500	9,026	0,009	9,059	8,983	9,022	0,011	9,045	8,965	22,330	0,031	22,390	22,250	22,330	0,026	22,380	22,240
1600	9,036	0,020	9,096	8,962	9,033	0,015	9,071	8,963	22,350	0,082	22,560	22,280	22,330	0,043	22,480	22,180
1700	9,048	0,014	9,094	9,005	9,047	0,012	9,088	8,985	22,350	0,061	22,560	22,130	22,350	0,052	22,440	22,250
1800	9,063	0,023	9,113	8,973	9,063	0,022	9,115	8,977	22,350	0,068	22,560	22,280	22,330	0,027	22,490	22,180
1900	9,069	0,021	9,108	8,978	9,068	0,014	9,108	8,983	22,350	0,080	22,560	22,260	22,340	0,034	22,410	22,180
2000	9,086	0,010	9,130	9,046	9,092	0,009	9,123	9,039	22,340	0,026	22,440	22,230	22,350	0,021	22,400	22,280

Распределение вертикальных градиентов температуры и солёности подтверждает традиционные представления [5, 8] об однородности глубинных водных масс Черного моря и о том, что, кроме обмена через Босфор, источником относительно теплых глубинных вод служат и геотермальные потоки тепла. По данным, приведенным в табл. 2, видно, что вертикальный градиент температуры в слое 1000 – 2000 м меняется мало, составляя около $0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Он превышает вертикальный градиент в слое 500 – 900 м почти в 2 раза. Другая закономерность наблюдается в поле солёности. Здесь вертикальный градиент более чем на порядок уменьшается с глубиной (от $0,05\text{‰}/100\text{ м}$ между 500 и 900 м до менее $0,005\text{‰}/100\text{ м}$ в придонном слое). Эта разница в значительной степени обусловлена тем обстоятельством, что мы рассматриваем температуру *in situ*, а не потенциальную температуру.



а

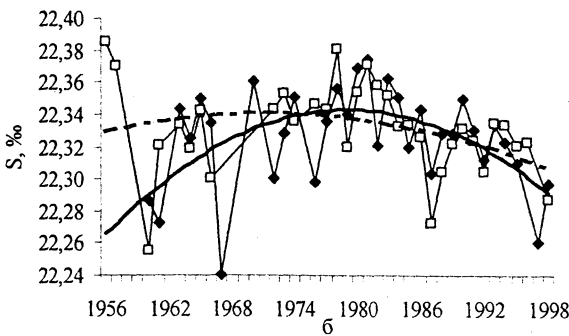
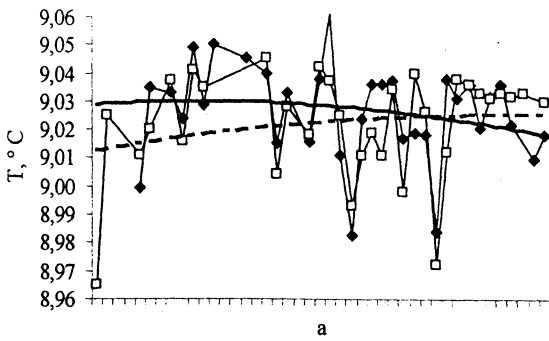


б

Р и с. 2. Временной ход температуры (а) и солёности (б) на горизонте 500 м в западной (зачерненные маркеры) и восточной (незачерненные маркеры) частях моря (параболические тренды для западной и восточной частей моря показаны соответственно сплошными и пунктирными жирными линиями)

Среднее по всему анализируемому слою стандартное отклонение температуры в западной части моря составляет $0,019\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в восточной $0,017\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. разность между ними равняется $0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$. В поле солёности отмечаются более выраженные отличия. Для западной части среднее по всему анализируемому слою стандартное отклонение по солёности составляет $0,139\text{‰}$, для восточной — $0,087\text{‰}$, т. е. разность между ними достигает $0,052\text{‰}$. Причем стандартное отклонение по солёности в западной части моря превышает стандартное отклонение в восточной части практически во всем анализируемом слое (табл. 2).

Рассматривая экстремальные значения температуры и солёности в отдельных частях моря, можно заключить, что они характеризуются более высокими значениями в западной части моря. Средняя разность между максимальными и минимальными значениями температуры для западной части моря составляет $0,122\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для восточной $0,114\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для солёности в западной части моря она составляет $0,36\text{‰}$, а в восточной $0,32\text{‰}$. Таким образом, в запад-



Р и с. 3. Временной ход температуры (а) и солёности (б) на горизонте 1500 м в западной (зачерненные маркеры) и восточной (незачерненные маркеры) частях моря (параболические тренды для западной и восточной частей моря показаны соответственно сплошными и пунктирными жирными линиями)

и солёность в целом возрастали после 1955 г. до начала 80-х годов, а затем начали уменьшаться. Это особенно ярко проявляется в изменениях солёности в западной части моря. Вместе с тем на более мелководных горизонтах эта тенденция прослеживается только по температуре, причем и на западе и на востоке моря. Таким образом, несмотря на невысокое качество глубоководных данных, особенно по солёности, можно констатировать увеличение интенсивности поступления мраморноморских вод через Босфор в первую половину анализируемого периода и его уменьшение — во вторую. Естественно, это наиболее четко проявляется в изменениях глубоководной солёности в западной части моря, поскольку контраст между T , S -индексами поступающих мраморноморских и черноморских вод максимален именно здесь, и он выражен прежде всего в поле солёности. Средняя скорость роста солёности на горизонте 1500 м между 1960 и 1980 гг. составляет $0,05\text{‰}/20$ лет. Такого же порядка скорость уменьшения солёности с начала 80-х годов. На востоке Черного моря практически во всем рассматриваемом слое соответствующие тенденции выражены слабее.

ной части моря отмечается бóльшая изменчивость гидрологических характеристик. Этот результат представляется совершенно естественным, так как межгодовая изменчивость температуры и солёности в рассматриваемом слое обусловлена, прежде всего непостоянным водообменом через Босфор. Кроме этого, пространственная изменчивость температуры и солёности несколько выше в западной части моря, чем в восточной [2].

Линейные тренды температуры и солёности на большинстве горизонтов незначимы на доверительных уровнях 95 – 99%. Параболический тренд, напротив, значим на большинстве горизонтов на доверительном уровне 99%, по крайней мере, начиная с 1000 м и глубже. Рис. 2, 3 и табл. 3 показывают, что глубже 1000 м на западе Черного моря температура

Линейные (в числителе) и параболические (в знаменателе) тренды на стандартных горизонтах для западной и восточной частей моря по солёности и температуре (значимые на 90-, 95-, 99%-ном уровнях тренды отмечены одной(*), двумя(**) и тремя (***) звездочками соответственно)

Горизонт, м	$S_{\text{зап}}$	$S_{\text{вост}}$	$T_{\text{зап}}$	$T_{\text{вост}}$
500	$-0,0008 t + 22,138$ $-5 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0015 t + 22,117$	$-0,0006 t + 22,101$ $-0,0002 t^2 + 0,0065 t + 22,048^{***}$	$-0,0005 t + 8,8537$ $-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0014 t + 8,8459$	$0,0005 t + 8,8554$ $-6 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0032 t + 8,8352^{***}$
1000	$0,0001 t + 22,289$ $-0,0002 t^2 + 0,0101 t + 22,19^{***}$	$-0,0005 t + 22,304^{**}$ $-5 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0017 t + 22,288^{***}$	$0,0006 t + 8,9273^{***}$ $-6 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0036 t + 8,9019^{***}$	$-0,0006 t + 8,9216^{***}$ $-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0023 t + 8,9091^{***}$
1500	$9 \cdot 10^{-5} t + 22,323$ $-0,0001 t^2 + 0,0051 t + 22,288^{***}$	$-0,0005 t + 22,343^{**}$ $-4 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0012 t + 22,329^{**}$	$-0,0003 t + 9,0338^{*}$ $-2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0006 t + 9,0237^{*}$	$-0,0003 t + 9,0147^{*}$ $-7 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0006 t + 9,0125^{*}$
2000	$0,0004 t + 22,344$ $-0,0001 t^2 + 0,0048 t + 22,311^{***}$	$-0,0008 t + 22,37$ $-3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0005 t + 22,354^{***}$	$9 \cdot 10^{-5} t + 9,0797$ $9 \cdot 10^{-5} t^2 - 0,0039 t + 9,1193^{***}$	$-0,0007 t + 9,0752^{***}$ $5 \cdot 10^{-5} t^2 - 0,0022 t + 9,1115^{***}$

Это привело к тому, что разность между T , S -индексами на западе и востоке моря в начале рассматриваемого периода возрастала, а затем стала уменьшаться. Причем это особенно хорошо проявляется в слое глубже 1500 м в поле солёности. Разность между средними величинами солёности в западной и восточной частях моря достигла здесь 0,08‰ в конце 70-х годов, а затем уменьшилась до нуля (рис. 4). Отмеченные тенденции свидетельствуют об усилении водообмена через Босфор после 1955 г. до конца 70-х годов XX столетия и о его ослаблении начиная с 80-х и до конца 90-х годов, т. е. о наличии изменчивости глубоководных термохалинных характеристик с типичным периодом 50 — 100 лет. Изменения глубоководной температуры формально не подтверждают этот вывод, по крайней мере для нескольких горизонтов (табл. 3, рис. 3). Однако к этим изменениям нужно подходить критически, так как они в значительной степени являются следствием методических причин. Действительно, как показано в [6], существуют следующие систематические различия между CTD- и батометрическими измерениями. В 80-е годы первые давали более высокую температуру по сравнению со вторыми, а в 90-е — наоборот. Это приводит к фиктивной изменчивости десятилетнего масштаба, препятствующей надёжному выделению естественной низкочастотной изменчивости температуры. Вместе с тем совместный анализ временных рядов глубоководной температуры и солёности (см., например, рис. 2, 3) указывает на наличие в них реальной изменчивости десятилетнего масштаба. Присутствие в анализируемых временных рядах как фиктивной, так и реальной низкочастотной амплитуды может приводить к существенному изменению и даже смене знака тренда при относительно небольшом изменении длины рассматриваемых рядов. Причем этот вывод справедлив, несмотря на формальную статистическую значимость тех или иных трендовых оценок.

Т а б л и ц а 4

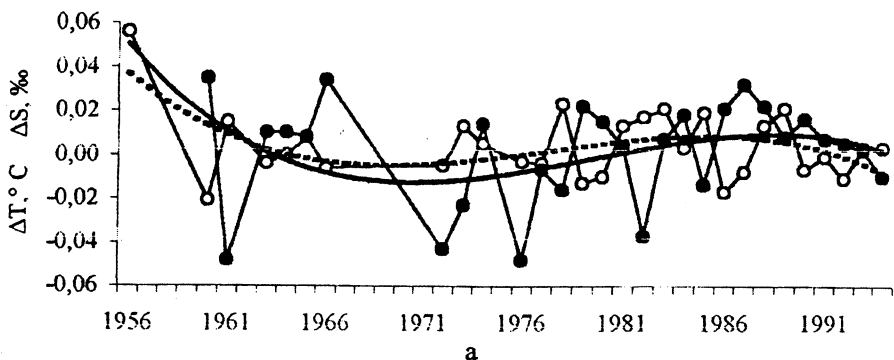
Величины первой ЭОФ на отдельных горизонтах для температуры и солёности в западной и восточной частях моря

Горизонт, м	$T_{\text{зап}}$	$T_{\text{вост}}$	$S_{\text{зап}}$	$S_{\text{вост}}$
500	-0,9505	-0,5336	-0,9648	-0,9955
1000	-0,2026	-0,5188	-0,1522	-0,0560
1500	-0,2076	-0,4897	-0,1489	-0,0460
2000	-0,1110	-0,4541	-0,1547	-0,0608

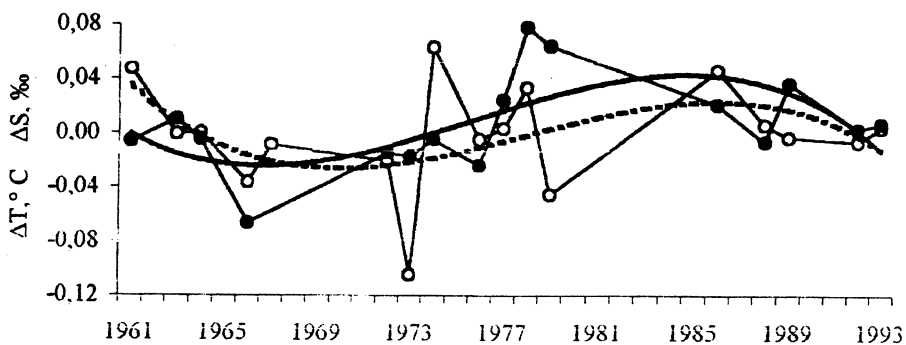
Т а б л и ц а 5

Процентный вклад первых четырех ЭОФ в суммарную дисперсию

Номер ЭОФ	$T_{\text{зап}}$	$T_{\text{вост}}$	$S_{\text{зап}}$	$S_{\text{вост}}$
1	53	47	85	73
2	33	36	11	19
3	10	12	3	5
4	4	5	1	3



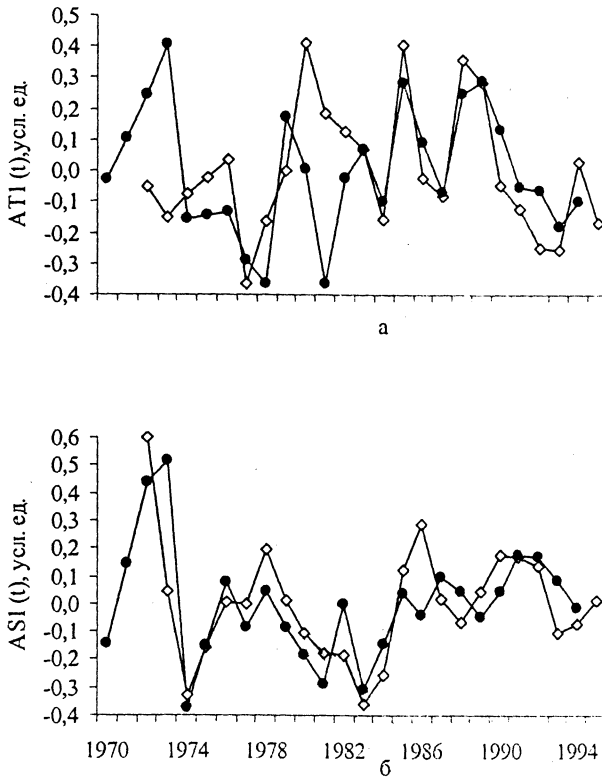
а



б

Р и с. 4. Временной ход разности температуры (незачерненные маркеры) и солёности (зачерненные маркеры) между западной и восточной частями моря на горизонтах 1500 м (а) и 1800 м (б) (полиномиальные тренды 3-го порядка показаны сплошными и пунктирными жирными линиями для солёности и температуры соответственно)

Для анализа изменчивости межгодового и десятилетнего масштабов обратимся к временным коэффициентам первых ЭОФ, характеризующих изменчивость температуры и солёности глубинных и придонных слоев в целом (табл. 4, 5, рис. 5). Отметим, что максимальный вклад в суммарную дисперсию вносят первые моды, выделенные по солёности в западной (85%) и восточной (73%) частях моря. Причем они коррелируют между собой на уровне 0,71. Рассмотрим поэтому прежде всего временные коэффициенты для этих мод (рис. 5, б). Они характеризуются когерентными межгодовыми флюктуациями с основным периодом около 6,5 года. В спектре первого временного коэффициента, рассчитанного по солёности для западной части моря, соответствующий пик значим на 80%-ном уровне, а для восточной — на уровне 95%. Когерентность между колебаниями солёности на этом периоде в западной и восточной частях моря достигает 0,89 при сдвиге фаз около 160° (рисунки, иллюстрирующие отмеченные факты, не приведены). Причем колебания солёности в восточной части моря, вероятно, лидируют, что видно и по самим временным реализациям (рис. 5, б). Изменчивость атмосферных характеристик с таким периодом хорошо известна. Она выделяется, в частности, в



Р и с. 5. Временные коэффициенты первых ЭОФ для температуры (а) и солёности (б) в западной (зачерненные маркеры) и восточной (незачерненные маркеры) частях моря

происхождении. Действительно, изменчивость ветра над Черным морем более выражена именно в восточной его части [5].

Первые эмпирические моды, рассчитанные по температуре, также обнаруживают наличие межгодовых колебаний (рис. 5, а). Однако на значимом уровне выделяются только колебания с периодом, вдвое меньшим описанного выше (около 3 лет). Процентный вклад первых мод по температуре существенно меньше, чем по солёности. Он составляет 53% для западной части моря и 47% для восточной. Поэтому не будем подробно анализировать здесь спектральные свойства первого временного коэффициента $AT1(t)$. Отметим только достаточно высокую положительную корреляцию между коэффициентами $ASI(t)$ и $AT1(t)$ в западной части моря (0,46), а также наличие в последнем изменчивости с периодичностью около 20 лет (рис. 5, а). Аналогичные колебания отмечаются во временном ходе температуры и солёности (рис. 2, 3), а также разности температуры и солёности между западной и восточной частями моря в слое 500 – 1000 м. Так, например, на горизонте 500 м и для температуры и для солёности выделяется уменьшение разности между

спектре индекса Североатлантического колебания (САК), характеризующего изменчивость в системе океан – атмосфера в Северной Атлантике. Несмотря на то, что САК представляет собой основной климатический сигнал межгодового масштаба, определяющий изменчивость гидрометеорологических характеристик не только над Северной Европой, но и в Черноморском регионе [10], соответствующий сигнал в глубоководных гидрологических характеристиках Черного моря обнаружен впервые. Тот факт, что колебания с периодом 6,5 года проявляются более значимо в восточной части моря и опережают по фазе соответствующие колебания в западной части, свидетельствует о преимущественно ветровом их

западной и восточной частями моря в начале 70-х годов до $-0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-0,25\text{ }‰$ и увеличение в начале 80-х до $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,15\text{ }‰$. На горизонте 1000 м отмечается аналогичная тенденция, только уменьшение отмечается в середине 70-х годов, а увеличение — в середине 80-х (для температуры от $-0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ и для солёности от $-0,05\text{ }‰$ до $0,06\text{ }‰$). Естественно, ограниченность имеющихся в наличии временных рядов не позволяет анализировать эту изменчивость на статистически значимом уровне. Однако сам факт ее присутствия в слое 500 – 1000 м не вызывает сомнений. Причем распространение сигнала происходит сверху вниз, а глубже 1000 м соответствующие колебания не выделяются на фоне шумов. Возможно, это свидетельствует о поверхностном происхождении отмеченных колебаний, тем более что соответствующая изменчивость неоднократно обнаруживалась во временных рядах стоков черноморских рек, определяющих в значительной степени термохалинную циркуляцию в море. Таким образом, квазидвадцатилетняя периодичность в изменчивости анализируемых характеристик, по всей вероятности, обусловлена изменчивостью речного стока. Не исключено, что параметры этих колебаний в глубоководной части Черного моря определяются также изменчивостью интенсивности поступления мраморноморских вод. На это может указывать отмеченная выше положительная корреляция между коэффициентами $AS1(t)$ и $AT1(t)$ в западной части моря. Однако низкое качество глубоководных данных на протяжении большей части анализируемого периода не дает возможность изучить этот вопрос более подробно на количественном уровне.

Заключение. Основной результат настоящей работы заключается в следующем. Несмотря на то, что глубоководные гидрологические характеристики Черного моря в значительной степени однородны, а выполненные до 90-х годов наблюдения не отличаются высоким качеством, анализ трендов по архивным данным после 1955 г. выявил увеличение солёности в западной части моря между серединой 50-х годов и началом 80-х. Следующие 20 лет характеризовались противоположной тенденцией. Средняя скорость роста глубоководной солёности между 1960 и 1980 гг. составляет $0,05\text{ }‰/20$ лет. Такого же порядка скорость уменьшения солёности с начала 80-х годов. Это свидетельствует об интенсификации водообмена через Босфор в первые 25 лет анализируемого периода и о его ослаблении в последующие 20 лет. На фоне параболического тренда выделяются межгодовая изменчивость с типичным периодом 6,5 года (вероятно, обусловленная изменчивостью в поле ветра, вызванной САК) и квазидвадцатилетняя периодичность (связанная, вероятно, с изменчивостью пресного баланса Черного моря).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтман Э.Н., Гертман И.Ф., Голубева З.А. Климатические поля солёности и температуры Черного моря. Атлас. — Севастополь: СО ГОИН, 1987. — 108 с.
2. Белокопытов В.Н. Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря. — Дис... канд. геогр. наук. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. — 160 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Э.И. Симонова и Э.Н. Альтмана. — СПб: Гидрометеиздат, 1991. — 462 с.

4. *Кныш В.В., Дельмисев С.Г., Коротаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофизический журнал. — 2002. — № 2. — С. 36 – 52.
5. *Леонов А. К.* Региональная океанография. Ч.1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. – Л.: Гидрометеониздат, 1960. — 765 с.
6. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* О климатических характеристиках полей температуры и солености в глубоководных слоях Черного моря // Морской гидрофизический журнал. — 2003. — № 3. — С. 47 – 57.
7. *Волков И.И., Скирта А.Ю., Маккавеев П.Н. и др.* О гидрофизической и гидрохимической однородности глубинных вод Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. — М.: Наука, 2002. — С. 161 – 169.
8. *Фалина А.С., Волков И.И.* О тонкой структуре и термохалинной устойчивости глубинных вод Черного моря // Океанология. — 2003. — 43, № 4. — С. 516 – 523.
9. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Тренд температуры и солености деятельного слоя в Черном море во второй половине 20-го века и его причины // Изв. РАН. ФАО. — 2004. — 40, № 6. — С. 832 – 841.
10. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н. и др.* Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // Морской гидрофизический журнал. — 2004. — № 2. — С. 42 – 59.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 04.04.05
После доработки 25.04.05

ABSTRACT Using archival hydrographic data for 1955 – 1998, the trends of deep-sea T , S -characteristics in the Black Sea as well as their inter-annual and decadal variability are analyzed. It is found out that salinity at the depth exceeding 1000 m increased in the western Black Sea between the mid of the 50ies and the early 80ies, and it decreased during the next 15 – 20 years. Average rate of salinity increase/decrease is about 0.05‰ per 20 years. It points to the intensification of water exchange through the Bosphorus during the first 25 years of the analyzed period and its weakening during the next 20 years. Against a background of a parabolic trend, the inter-annual variability with a typical period of about 6.5 years and a quasi-decadal periodicity are distinguished.