

А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, В.Н. Белокопытов

## Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море

По данным контактных и спутниковых измерений с середины прошлого столетия по настоящее время построены осредненные за десятилетние периоды поля температуры и солености на стандартных горизонтах в Черном море в слое 0 – 500 м и описаны характеристики их пространственно-временной изменчивости. В верхнем слое моря 0 – 50 м междесятилетняя изменчивость температуры представлена низкочастотными колебаниями, размах которых на поверхности моря достигает 1°C в зимние месяцы и 2°C – в летние. Эти колебания синфазны с колебаниями температуры воздуха, период которых составляет 60 – 70 лет. В изменчивости солености в верхнем слое присутствует отрицательный тренд, составляющий  $-0,04\text{‰}/10$  лет, на фоне которого выделяются колебания с периодом 20 – 30 лет и размахом до  $0,2\text{‰}$ . В области пикноклина и температура и соленость растут со скоростью до  $0,02\text{°C}/10$  лет и  $0,05\text{‰}/10$  лет соответственно.

**Ключевые слова:** Черное море, температура, соленость, десятилетняя изменчивость.

### Введение

Долговременная изменчивость полей температуры и солености в Черном море служит надежным индикатором региональных изменений климата. Представления о ней складывались по мере накопления данных и увеличения продолжительности рядов наблюдений. Первые исследования межгодовой изменчивости температуры и солености в Черном море появились в 1980 – 1990-е гг., когда длина ряда квазирегулярных измерений, начавшихся в 1950-е гг., составила более 25 лет. В этот период были выявлены такие изменения в термохалинной структуре вод, как увеличение температуры и солености в пикноклине и подъем его верхней границы [1 – 4]. В исследованиях следующих лет на основе анализа более продолжительных рядов данных измерений отмечалось наличие отрицательного тренда в изменчивости температуры и солености в поверхностном слое моря и сохранение положительного тренда в пикноклине [5 – 9]. По результатам обработки данных спутниковых измерений, начавшихся с конца 1970-х гг., в изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) была отмечена смена знака тренда с отрицательного на положительный, произошедшая в начале 1990-х гг. [10, 11].

Большая часть современных исследований многолетних изменений термохалинных характеристик в Черном море посвящена их изменчивости в отдельных слоях – в холодном промежуточном слое (ХПС) [5, 12], в пикноклине [9, 13] и на поверхности моря [10, 11]. В ряде работ представлена общая характеристика долговременной изменчивости температуры и солености как в верхнем слое моря, так и в пикноклине [6 – 8, 14]. Несмотря на большое число исследований, посвященных данной проблеме, основное внимание в них, как правило, уделяется выявлению и анализу трендов в многолетней изменчивости термохалинных характеристик, в то время как изменения их пространственного распределения остаются неизученными.

© А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, В.Н. Белокопытов, 2013

Целью настоящей работы является изучение долговременной изменчивости температуры и солёности во всем верхнем 500-метровом слое Черного моря в период с середины прошлого столетия по настоящее время. Исследование выполняется на основе восстановления десятилетних полей температуры и солёности на регулярной сетке методом оптимальной интерполяции по данным контактных и спутниковых измерений. Наряду с количественной оценкой изменений температуры и солёности, проводится анализ изменений пространственной структуры термохалинных полей.

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

В работе использовались следующие данные контактных и дистанционных измерений в Черном море:

– данные судовых измерений температуры и солёности с 1951 по 2008 гг. и измерений температуры дрейферами с 2001 г. из банка океанографических данных МГИ НАН Украины [15, 16];

– данные измерений температуры и солёности глубоководными буйами-профилемерами на горизонтах от 4 до 1500 м (565 профилей за 2005 – 2008 гг.) [17];

– среднемесячные данные по ночным спутниковым измерениям ТПМ на сетке 4 × 4 км за 1985 – 2007 гг. [18].

Для Черного моря наиболее длительный период наблюдений температуры и солёности представлен данными судовых измерений. При этом наибольшее число измерений выполнено в промежутке между началом 1950-х и серединой 1990-х гг. Как правило, данные судовых измерений характеризуются неравномерным распределением по времени, глубине и акватории моря. Летние месяцы лучше обеспечены данными, чем зимние. Количество измерений убывает с глубиной (табл. 1). С середины 1990-х гг. количество судовых измерений уменьшилось, и в настоящее время основной вклад в общий массив данных вносят спутниковые измерения ТПМ, измерения температуры дрейферами, а также измерения температуры и солёности глубоководными буйами-профилемерами. Наиболее представительным и регулярным источником данных являются спутниковые измерения ТПМ. В последние два десятилетия существует недостаток данных по солёности на поверхности моря, связанный не только с уменьшением числа судовых измерений, но и с тем, что измерения современными *CTD*-зондами в основном начинаются не с поверхности моря, а с горизонтов 1 – 2 м, а буйами-профилемерами – с горизонтов 4 – 5 м.

Построение гидрологических полей проводилось на основе данных, сгруппированных за десятилетние периоды времени с пятилетним сдвигом: 1951 – 1960, 1956 – 1965, 1961 – 1970 гг. и так далее. Объединение данных за десятилетия обеспечивало достаточно равномерное распределение их по пространству на большинстве горизонтов, что необходимо для выполнения горизонтальной интерполяции и дальнейшего анализа изменчивости средних по акватории значений. Для слоя 0 – 150 м вычисления выполнялись для каждого горизонта с интервалом 10 м, а также для горизонта 75 м. На глубинах от 200 до 500 м интервал между горизонтами составлял 100 м.

**Количество контактных измерений температуры (солёности) судовыми приборами, глубоководными буями-профилемерами\* и измерений температуры дрейфтерами\*\* на стандартных горизонтах 0, 100 и 500 м за 1951 – 2008 гг.**

Горизонт, месяцы	1951 – 1960	1961 – 1970	1971 – 1980	1981 – 1990	1991 – 2000	2001 – 2008
0 м	913	2 141	3 545	3 977	1 244	10028**
февраль – март	(768)	(1780)	(3316)	(3951)	(1173)	–
0 м	1 646	3 765	5 767	8 990	2 131	103+17748**
июль – август	(1478)	(3520)	(5175)	(8816)	(1877)	(53)
100 м	3 110	4 854	6 296	11 877	5 121	235+565*
январь – декабрь	(2660)	(4187)	(5178)	(11445)	(5382)	(221+565*)
500 м	219	1 197	2 887	5 291	2 999	52+565*
январь – декабрь	(173)	(1093)	(2781)	(5390)	(3079)	(23+565*)

Тенденции долговременной изменчивости температуры и солёности изучались для слоев моря 0 – 50 м, ХПС и 50 – 500 м. Для верхнего слоя моря 0 – 50 м и ХПС, где сезонные изменения превышают межгодовые, анализ десятилетней изменчивости термохалинных характеристик выполнялся для двух сезонов – зимнего (февраль – март) и летнего (июль – август). Для периода 1951 – 1995 гг. все десятилетние поля рассчитывались по данным судовых измерений. Поля ТПМ восстанавливались отдельно по данным спутниковых и контактных измерений. Для периода 2001 – 2008 гг. при построении полей ТПМ по данным контактных измерений наряду с судовыми использовались данные дрейфтеров, а для слоя 10 – 50 м — данные глубоководных буй-профилемеров (табл. 1). Из-за недостатка данных или их неравномерного распределения по акватории в этом слое моря не были рассчитаны зимние поля температуры и солёности для 1991 – 2008 гг., летние поля солёности для 1996 – 2008 гг. и летние поля температуры для 1996 – 2005 гг.

Для слоя 50 – 500 м, где влияние сезонного хода ослабевает, расчеты проводились без разделения на сезоны. Это увеличило количество интерполируемых данных (табл. 1) и позволило построить поля температуры и солёности для всех десятилетних периодов.

Для построения горизонтальных полей температуры и солёности использовался метод оптимальной интерполяции [19, 20]. Поля восстанавливались в узлах регулярной сетки с шагом 5' по широте и 8,57' по долготе (5 × 5 миль). Полученные поля дополнительно сглаживались с целью устранения пространственных неоднородностей, обусловленных мезомасштабными процессами, высокочастотными шумами и случайными погрешностями измерений.

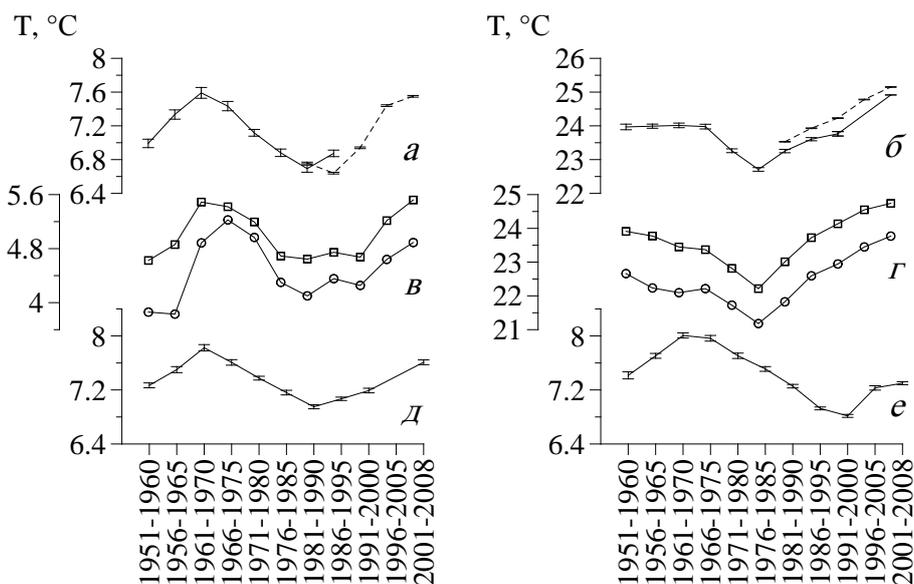
Количественные оценки междесятилетних изменений температуры и солёности на отдельных горизонтах выполнялись на основе сравнения их средних за десятилетия значений, вычисленных по полученным на регулярной

сетке полям. Доверительные интервалы для средних на каждом горизонте значений температуры и солености рассчитывались на основе дисперсии, осредненной по всем узлам сетки. Дисперсия в каждом отдельном узле вычислялась как отклонение исходных данных по температуре или солености в окрестности узла от среднего значения в этом узле, в качестве которого принималось значение, рассчитанное в результате оптимальной интерполяции.

### Результаты и их обсуждение

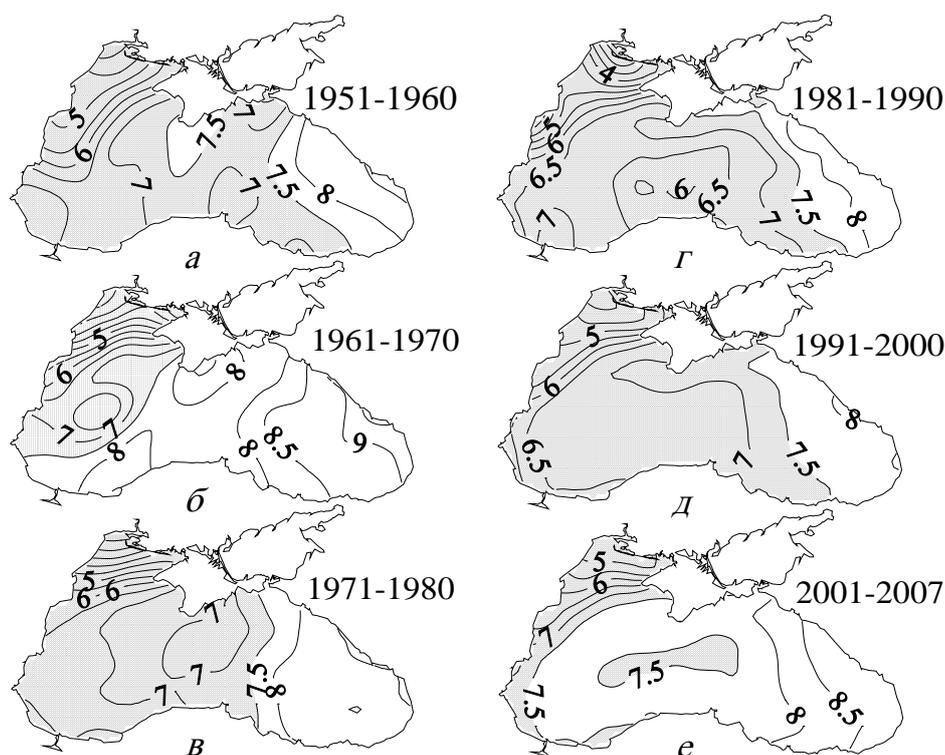
**Десятилетняя изменчивость температуры в поверхностном слое моря и ХПС.** Десятилетняя изменчивость температуры в поверхностных водах моря имеет квазипериодический характер. Но для зимы и лета колебания различаются по амплитудно-фазовым характеристикам (рис. 1, *a, б*). На поверхности моря температура в зимний период увеличивалась к 1960-м гг., затем отмечалось ее уменьшение на 1°C к началу 1990-х гг. и последующее увеличение, составляющее более 1°C (рис. 1, *a*). В летние месяцы ТПМ уменьшилась с 1950-х гг. к началу 1980-х гг. на 1,3°C. Ее увеличение в последующие годы составило 2°C (рис. 1, *б*). Разница между значениями температуры по спутниковым данным и данным контактных измерений в среднем для всех десятилетий не превышает 0,3°C. Эта величина соответствует расхождению в значениях, полученным при сравнении данных контактных и спутниковых измерений для Черного моря в работах [21, 22].

Отметим, что подобный характер долговременной изменчивости температуры поверхностных вод, с максимальными значениями температуры в 1960-е гг. и минимальными в 1980-е – начале 1990-х гг., наблюдается и для температуры в восточной части Средиземного моря [23].



**Р и с. 1.** Десятилетняя изменчивость средних значений ТПМ (°C) по данным контактных измерений (сплошная линия) и спутниковых измерений (штриховая) (*a, б*), температуры воздуха в Севастополе (○) и Ялте (□) (*в, г*), средних значений температуры на горизонте 50 м (*д, е*) в феврале – марте (*a, в, д*) и июле – августе (*б, г, е*)

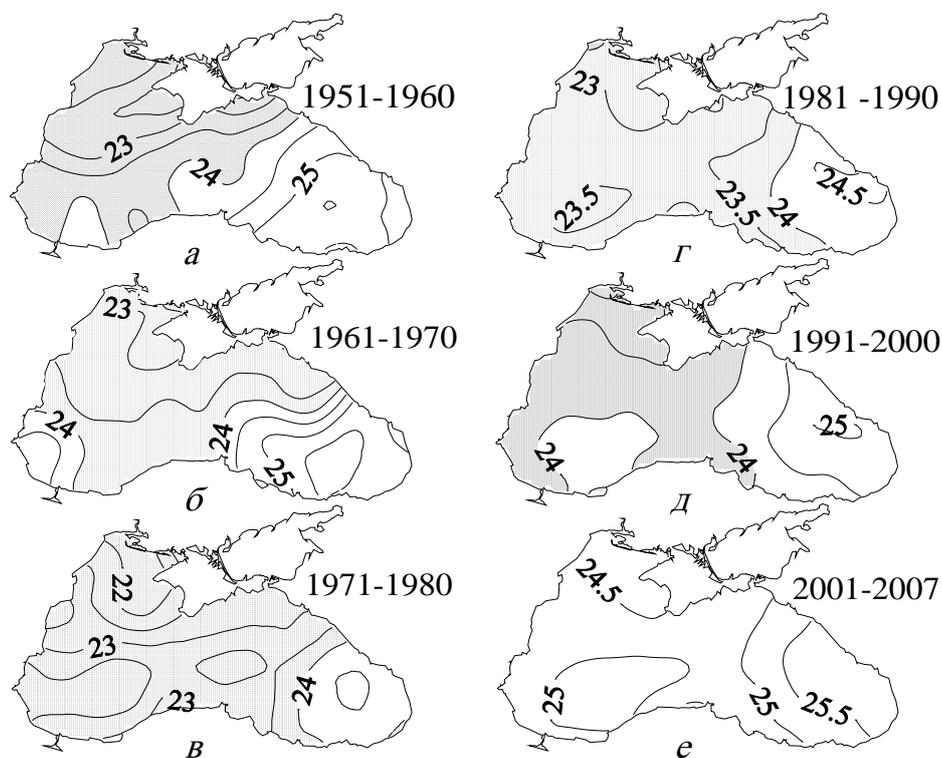
При оценке величины периода колебаний температуры поверхности Черного моря можно учесть, что на десятилетних временных масштабах эти колебания совпадают по фазе с колебаниями температуры воздуха на береговых станциях в Севастополе и Ялте (рис. 1, в, з), по которой накоплены более продолжительные ряды наблюдений, чем по ТПМ. Станции расположены на юге Крымского п-ова и поэтому в наибольшей степени отражают температуру воздуха над акваторией моря. Таким образом, можно обоснованно предположить, что оценки периода колебаний для температуры воздуха в Черноморском регионе, полученные по вековым рядам данных и составляющие 60 – 70 лет [24], могут быть отнесены и к периоду колебаний ТПМ.



**Р и с. 2.** Десятилетние поля зимней температуры поверхности моря ( $^{\circ}\text{C}$ ), построенные по данным судовых измерений (а, б, в, з) и спутниковым данным (д, е) (области с температурой ниже  $7,5^{\circ}\text{C}$  затемнены)

На рис. 2 и 3 представлены десятилетние поля ТПМ для зимнего и летнего сезонов. Отметим, что карты для двух последних десятилетий построены по данным спутниковых измерений. Крупномасштабная пространственная структура поля ТПМ в зимний период характеризуется увеличением температуры с севера на юг в области северо-западного шельфа (с высокими горизонтальными градиентами температуры) и с запада на восток в глубоководной акватории (рис. 2). Такое распределение температуры в основных чертах отмечается во все десятилетние периоды. Междесятилетняя изменчивость главным образом проявляется в количественных изменениях самой темпера-

туры. Так, например, температура в восточной части моря и вдоль кромки северо-западного шельфа изменяется соответственно с 8,5 и 6,5°C в 1960-е гг. (рис. 2, б) до 7,5 и 5,5°C в 1980-е гг. (рис. 2, з), т. е. уменьшается на 1°C. В начале настоящего столетия эти значения приблизились к наблюдавшимся в 1960-е гг. (рис. 2, б, е). Перенос Основным Черноморским течением более теплых вод с востока, хорошо заметный вдоль берегов Крыма в 1980-е и 1990-е гг. (рис. 2, з, д), демонстрирует зависимость пространственного распределения температуры от структуры крупномасштабной циклонической циркуляции вод.



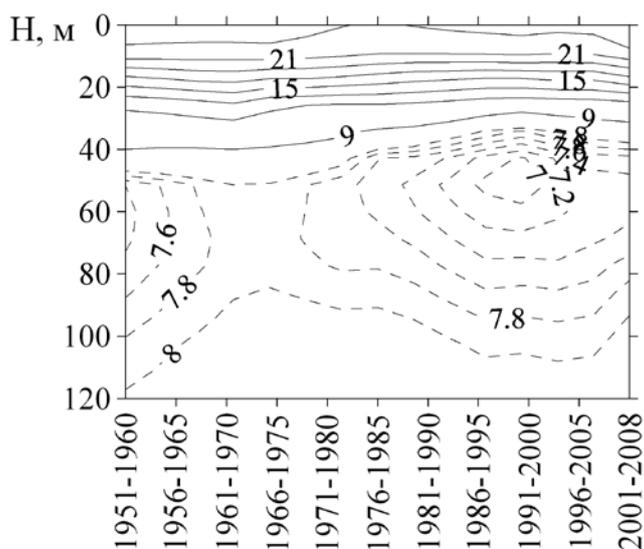
**Р и с. 3.** Десятилетние поля летней температуры поверхности моря (°C), построенные по данным судовых измерений (а, б, в, з) и спутниковым данным (д, е) (области с температурой ниже 24°C затемнены)

Пространственное распределение температуры в летний сезон характеризуется ее увеличением с севера-запада на юго-восток (рис. 3). Такая структура поля сохраняется во все десятилетия. По сравнению с зимним сезоном различия в температуре по акватории небольшие. В 1970-е и 1980-е гг. на большей части моря отмечается ТПМ менее 24°C (рис. 3, в, з). В 1950, 1960 и 1990-е гг. общая площадь поверхности моря с температурой выше и ниже 24°C примерно одинакова (рис. 3, а, б, д). Последнее десятилетие выделяется тем, что не только вся акватория моря имеет температуру выше 24°C, но и присутствуют обширные области в восточной и юго-западной частях моря, температура которых превышает 25°C (рис. 3, е).

Изменения температуры на горизонте 50 м (рис. 1, *д, е*) характеризуют изменчивость в ХПС. Здесь ход десятилетней изменчивости в зимние месяцы аналогичен изменчивости на поверхности (рис. 1, *а, д*), так как в этот сезон верхний квазиоднородный слой заглубляется до ХПС, воды которого в результате обновляются [4, 12, 25]. Максимальная температура по зимним данным отмечается в 1960-е гг. и в последнее десятилетие, минимальная – в 1980-е гг.

Летняя температура на этом горизонте во все десятилетние периоды не превышает 8°C (рис. 1, *е*). В это время года холодные воды ХПС «заперты» под сезонным термоклином, максимальные вертикальные градиенты плотности которого располагаются в окрестности горизонта 20 м и составляют в среднем  $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-4}$  [2, 4, 26]. Максимальное значение температуры летом отмечается в 1960-е гг., минимальное – в 1990-е гг. Разница между максимальными и минимальными значениями температуры на горизонте 50 м для двух рассматриваемых сезонов составляет около 1°C (рис. 1, *д, е*).

Уменьшение температуры в ХПС в летний сезон в 1980-е и 1990-е гг. объясняется двумя причинами. Во-первых, в эти периоды происходило усиленное обновление ХПС в зимние месяцы, характеризующиеся отрицательными температурными аномалиями. Во-вторых, это сопровождалось повышением теплоизоляции летнего ХПС за счет увеличения плавучести поверхностных вод, связанного с положительным трендом в изменчивости летней ТПМ с начала 1980-х гг. и низкими значениями солености в поверхностном слое [25].



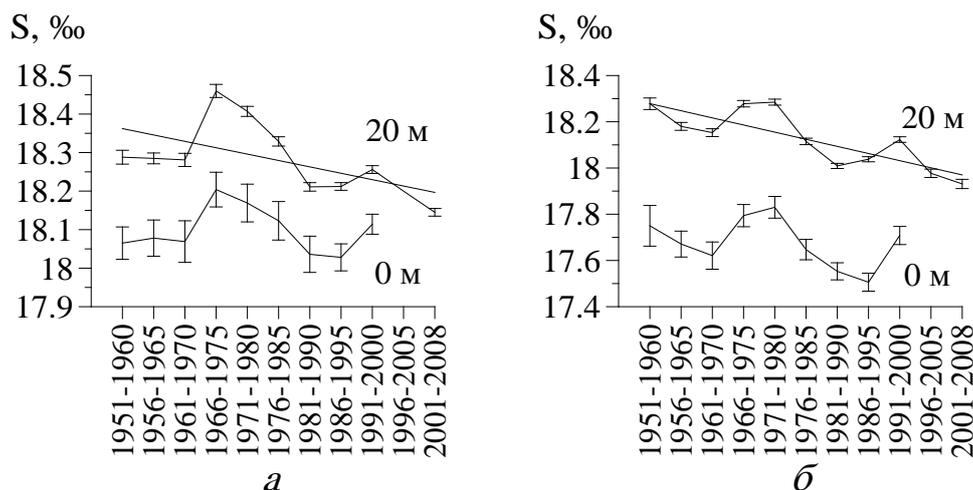
Р и с. 4. Десятилетняя изменчивость температуры (°C) в ХПС по данным за июль – август

На диаграмме временных изменений температуры воды в ХПС по летним данным, приведенной на рис. 4, видно, что изменчивость температуры в этом слое также имеет вид низкочастотных квазипериодических колебаний, проявляющихся в изменении толщины ХПС, положения его верхней и нижней

границ и величины температуры в ядре ХПС. В 1950-е гг. температура в ядре ХПС понижалась до  $7,4^{\circ}\text{C}$ . В этот период отмечалось наиболее глубокое положение его нижней границы (около 120 м). В 1960-е гг. наблюдались минимальная толщина ХПС и повышенная для этого слоя температура, которая увеличилась до  $7,8 - 8^{\circ}\text{C}$ . С 1970-х до 1990-х гг. происходило увеличение объема вод ХПС и наблюдался подъем его ядра ближе к поверхности моря (в среднем по морю на 10 м). При этом температура в ядре упала до величин ниже  $7^{\circ}\text{C}$ . В 1990-е гг. отмечалось наиболее высокое положение верхней границы ХПС (40 м). С середины 1990-х гг. температура вод в ХПС возрастала.

**Десятилетняя изменчивость солености в поверхностном слое моря 0 – 50 м.** В верхнем слое моря 0 – 50 м квазипериодический характер изменчивости отмечается и для солености (рис. 5). Однако период колебаний у солености меньше, чем у температуры, и составляет 20 – 30 лет. Размах колебаний в среднем равен  $0,2\text{‰}$ . Характер изменчивости незначительно различается для обоих сезонов и сохраняется в пределах верхнего слоя моря.

На горизонте 20 м (для которого продолжительность ряда данных наблюдений больше, чем для поверхности) локальные по времени максимумы солености для двух сезонов отмечаются в 1966 – 1975 и 1991 – 2000 гг., а минимумы – в 1961 – 1970, 1986 – 1995 и 2001 – 2008 гг. (рис. 5). На фоне квазипериодических колебаний выделяется отрицательный линейный тренд (особенно хорошо выраженный летом), который составляет в среднем для двух сезонов  $-0,04\text{‰}/10$  лет. Наличие этого тренда согласуется с положительным трендом в изменчивости баланса пресных вод в Черном море [27].



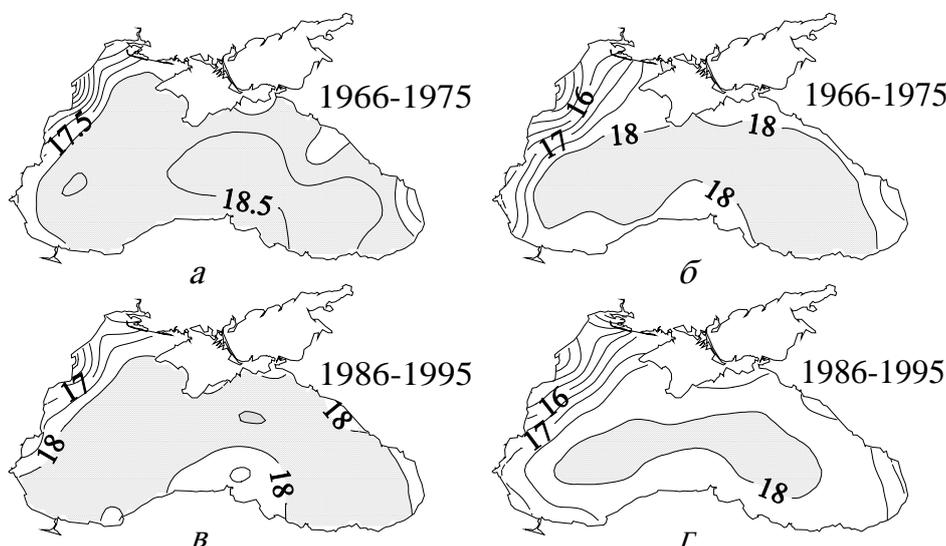
**Р и с. 5.** Десятилетняя изменчивость средних по акватории моря значений солености ( $\text{‰}$ ) на поверхности моря и горизонте 20 м по данным за февраль – март (а) и июль – август (б) (прямые линии – линейные тренды)

На рис. 6 приведены карты распределения солености на поверхности моря для периодов 1966 – 1975 и 1986 – 1995 гг., в которые отмечались ее максимальные и минимальные средние значения (рис. 5). Видно, что пространственная структура поля солености, обусловленная крупномасштабной цикло-

нической циркуляцией в море, в основном не меняется. Высокие значения солёности отмечаются в глубоководной части моря, а низкие – в прибрежной части акватории, особенно вблизи устьев крупных рек. Но величины солёности и площадь, ограниченная изогалинами с высокими значениями, претерпевают существенные изменения.

По зимним данным за 1966 – 1975 гг. в восточной части моря значительную область занимают воды с солёностью выше 18,5‰ (рис. 6, а). Отметим, что здесь в конце 1960-х и начале 1970-х гг. отмечалось усиление циклонической завихренности напряжения трения ветра [28], что может являться причиной высоких значений солёности за счет увеличения вертикальной скорости на нижней границе экмановского слоя и подъема соленых вод к поверхности. В 1986 – 1995 гг. солёность на поверхности не превышает величину 18,5‰ (за исключением центра восточного циклонического круговорота) (рис. 6, в).

По летним данным 1966 – 1975 гг. область со значениями солёности 18‰ и более охватывает всю глубоководную часть моря (рис. 6, б). В 1986 – 1995 гг. область, ограниченная изогалиной 18‰ значительно уменьшилась, а воды с солёностью меньше 17,5‰ распространяются вдоль юго-западного берега до прибофорского района (рис. 6, г).

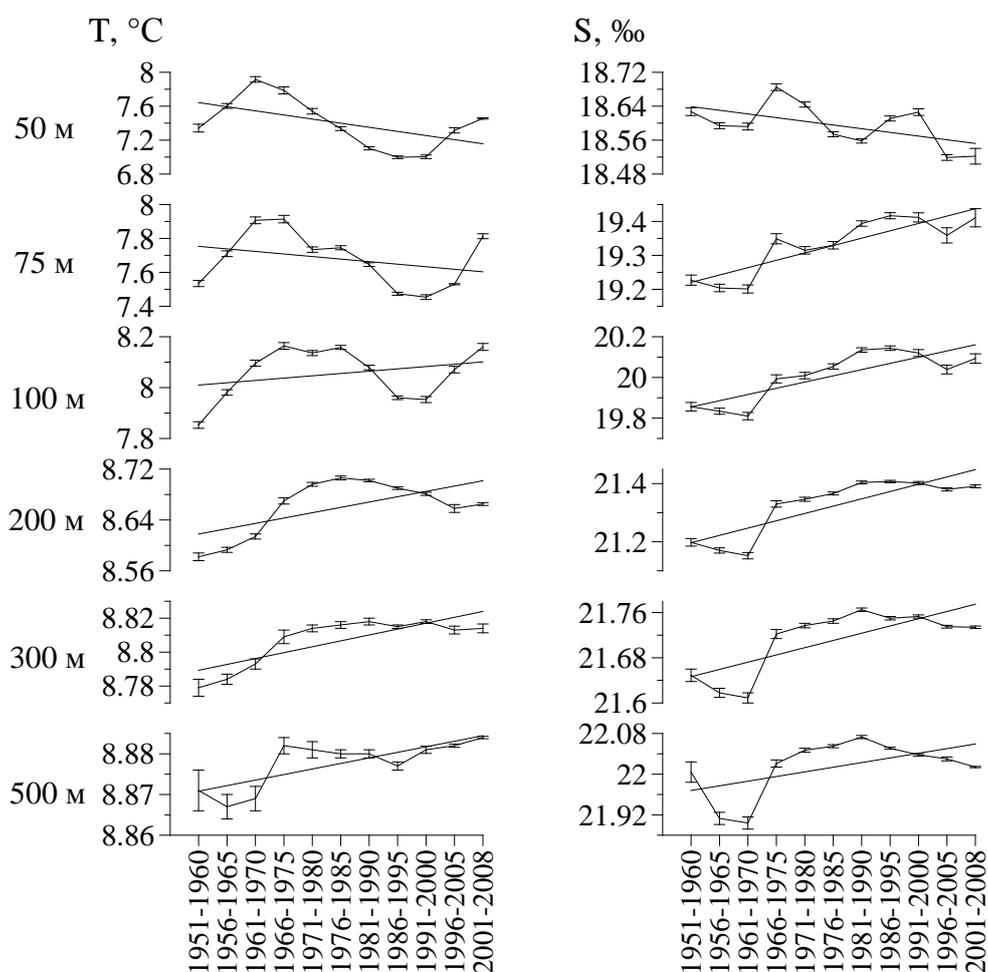


**Р и с. 6.** Распределение солёности (‰) на поверхности моря в 1966 – 1975 гг. (а, б) и 1986 – 1995 гг. (в, г) по данным за февраль – март (а, в) и июль – август (б, г) (области с солёностью выше 18‰ затемнены)

**Десятилетняя изменчивость температуры и солёности в слое 50 – 500 м.** В пределах этого слоя на глубинах 50 – 200 м расположен постоянный пикноклин (часто называемый галоклином, так как основной вклад в изменения плотности в этом слое Черного моря вносит солёность). Максимальные вертикальные градиенты плотности в пикноклине находятся на глубинах 75 – 100 м и составляют в среднем  $0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-4}$  [2, 4, 26].

В верхнем слое моря и пикноклине наблюдаются противоположные тенденции в изменчивости солёности. Если в верхнем слое моря солёность в

изучаемый период имела тенденцию к уменьшению, то в слое 75 – 500 м она увеличивалась (рис. 7). Смена знака трендов десятилетней изменчивости солености происходит в верхней части пикноклина между горизонтами 50 и 75 м (рис. 7, табл. 2). Значимые на 95%-ном доверительном уровне положительные тренды получены для слоя 75 – 300 м (табл. 2). Отметим, что эти тренды обусловлены главным образом резким увеличением солености в 1966 – 1975 гг. во всем исследуемом слое 0 – 500 м. Под пикноклином после этого периода не наблюдается существенных ее изменений. Отмечается лишь небольшое увеличение солености к 1981 – 1990 гг. и последующее ее небольшое уменьшение.



**Р и с. 7.** Десятилетняя изменчивость средних температуры (°C) и солености (‰) на горизонтах 50, 75, 100, 200, 300 и 500 м по данным, осредненным за все сезоны (прямые линии – линейные тренды)

В многолетних изменениях температуры в слое 50 – 200 м прослеживается временной сдвиг в наступлении максимума при увеличении глубины.

Видно, что на горизонте 50 м максимум температуры отмечается в 1961 – 1970 гг. На горизонте 200 м он смещается к 1976 – 1985 гг. (рис. 7).

Уменьшение температуры на горизонте 100 м до значений ниже 8°C в 1950-е гг. и в период с середины 1980-х до середины 1990-х гг. демонстрирует увеличение толщины ХПС в эти десятилетия (рис. 7).

В отличие от солёности отклик на изменчивость внешних факторов, действующих на поверхности, в десятилетней изменчивости температуры прослеживается до более глубоких горизонтов. Смена знака тренда с отрицательного (отмечаемого в ХПС) на положительный для температуры происходит с горизонта 100 м, ниже которого отмечается общая тенденция к ее повышению (рис. 7). Значимые на 95%-ном доверительном уровне положительные тренды получены для слоя моря 150 – 500 м. (табл. 2). На горизонте 500 м отмечается, как и у солёности, резкое увеличение температуры в 1966 – 1975 гг.

Т а б л и ц а 2

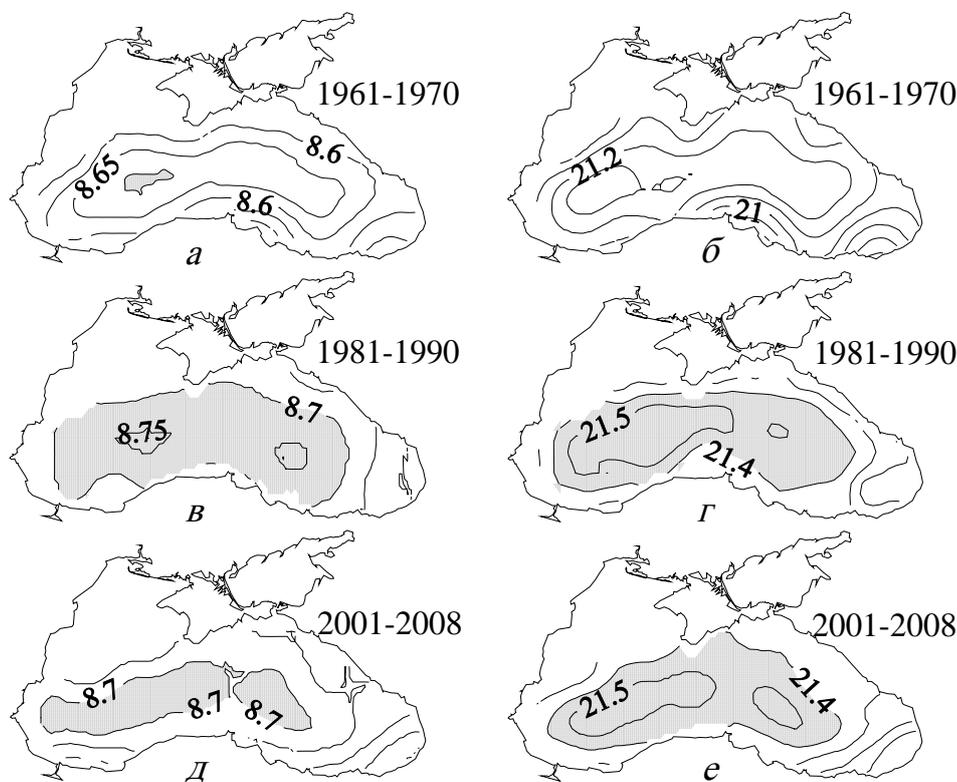
**Характеристики линейных трендов десятилетней изменчивости температуры и солёности в слое 50 – 500 м в период 1951 – 2008 гг.**

Горизонт, м	Температура, °С		Солёность, ‰	
	Среднее	Коэффициенты линейных трендов, °С/10 лет	Среднее	Коэффициенты линейных трендов, ‰/10 лет
50	7,399	-0,0970	18,595	-0,0174
75	7,678	-0,0300	19,329	<b>0,0434</b>
100	8,055	0,0182	20,008	<b>0,0611</b>
150	8,462	<b>0,0282</b>	20,863	<b>0,0740</b>
200	8,659	<b>0,0168</b>	21,322	<b>0,0503</b>
300	8,806	<b>0,0069</b>	21,711	<b>0,0256</b>
500	8,877	<b>0,0027</b>	22,014	0,0183

**П р и м е ч а н и е.** Жирным шрифтом выделены статистически значимые на 95%-ном доверительном уровне коэффициенты линейных трендов.

На рис. 8 приведены карты пространственного распределения температуры и солёности для горизонта 200 м в 1961 – 1970, 1981 – 1990 и 2001 – 2008 гг. Пространственное распределение температуры и солёности на этом горизонте характеризуется более высокими их значениями в центре моря и низкими на периферии, что обусловлено циклоническим характером крупномасштабной циркуляции и куполообразным строением пикноклина. Такая структура полей сохраняется во все десятилетия. В междесятилетних изменениях поля температуры на горизонте 200 м можно отметить следующие особенности. Зона, ограниченная изотермой 8,7°C, в 1960-е гг. занимает неболь-

шую область в западной части моря (рис. 8, а). К 1980-м гг. она увеличивается и охватывает всю глубоководную часть, причем появляются области с температурой выше 8,75°C. При этом среднее значение температуры по акватории увеличивается на 0,1°C (рис. 7). В первое десятилетие текущего столетия происходит небольшое уменьшение температуры. Область, ограниченная изотермой 8,7°C, уменьшается, а участки с температурой выше 8,75°C исчезают.



**Р и с. 8.** Распределение температуры (°C) (а, в, д) и солёности (‰) (б, г, е) на горизонте 200 м в 1961 – 1970, 1981 – 1990 и 2001 – 2008 гг. по данным, осредненным за все сезоны (области с температурой выше 8,7°C и солёностью выше 21,4‰ затемнены)

Похожие изменения отмечаются на горизонте 200 м и для солёности. В 1960-е гг. область с солёностью более 21,3‰, находящаяся в западной части моря, имеет небольшие размеры (рис. 8, б). В 1980-е гг. изогалина 21,4‰ охватывает всю глубоководную часть моря, а в западной части солёность повышается до 21,5‰ (рис. 8, г). Среднее значение солёности по акватории увеличивается на 0,25‰ (рис. 7). В начале XXI столетия распределение солёности в основном такое же, как и в 1980-е гг. (рис. 8, е).

**Соотношение внутригодовой и десятилетней изменчивости.** В верхнем слое моря 0 – 50 м доминирующим видом временной изменчивости является сезонный цикл [4, 26]. На поверхности моря размах годового хода температуры (разница между максимальным и минимальным значениями) по

многолетним данным в среднем составляет  $17^{\circ}\text{C}$ , что значительно превосходит размах десятилетних колебаний, составляющий в изучаемый период от  $1^{\circ}\text{C}$  зимой до  $2^{\circ}\text{C}$  летом. Размах внутригодового хода солености на поверхности имеет величину около  $0,6\text{‰}$ , а десятилетние изменения составляют не более  $0,2\text{‰}$ . С глубиной амплитуда сезонного хода уменьшается. Размах десятилетних колебаний температуры и солености начинает превосходить внутригодовой ход с горизонта 75 м. Так, например, на горизонте 120 м для температуры он составляет  $0,3^{\circ}\text{C}$ , что превосходит сезонные изменения в этом слое почти в 3 раза, а для солености составляет  $0,4\text{‰}$ , в то время как размах сезонного хода на этом горизонте равен  $0,15\text{‰}$ .

### Выводы

В результате анализа полей температуры и солености, восстановленных по данным за десятилетние периоды для февраля – марта и июля – августа с середины прошлого столетия по настоящее время в слое 0 – 500 м, получены количественные оценки десятилетних изменений средних по горизонтам значений температуры и солености и отмечены следующие тенденции их изменчивости.

В верхнем слое моря 0 – 50 м в долговременной изменчивости термохалинных характеристик присутствуют низкочастотные квазипериодические колебания с периодом 60 – 70 лет для температуры и 20 – 30 лет для солености. Размах колебаний осредненных за десятилетия величин ТПМ достигает  $1^{\circ}\text{C}$  в зимние месяцы и  $2^{\circ}\text{C}$  – в летние. В изменчивости солености в верхнем слое наблюдается отрицательный тренд ( $-0,04\text{‰}/10$  лет), согласующийся с положительным трендом в балансе пресных вод Черного моря.

С увеличением глубины влияние внешних факторов, действующих на поверхности моря и обуславливающих изменчивость термохалинных полей в его верхнем слое, ослабевает, а характер десятилетней изменчивости температуры и солености изменяется. В слое 75 – 300 м в изменчивости солености и в слое 150 – 500 м в изменчивости температуры получены значимые положительные тренды (в среднем  $0,05\text{‰}/10$  лет и  $0,02^{\circ}\text{C}/10$  лет соответственно).

Таким образом, тенденции десятилетней изменчивости температуры и солености в верхнем слое моря и пикноклине различны. Это говорит о том, что определяющую роль в долговременной изменчивости термохалинных характеристик в разных слоях моря играют различные факторы. Анализ причин всех полученных изменений выходит за рамки настоящей статьи. Но можно отметить, что характер долговременной изменчивости температуры и солености определяется совокупностью многих внешних факторов, действующих на поверхности и боковых границах моря, таких как потоки тепла, осадки, испарение, ветер, сток рек, водообмен через проливы и других. Поэтому необходимо не только изучить воздействие каждого внешнего фактора на изменчивость температуры и солености, но и провести комплексный анализ влияния всей совокупности факторов, включая стратификацию пикноклина и интенсивность вертикального обмена между слоями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрологической структуры вод Черного моря и ее связь с внешними факторами // Водные ресурсы. – 1980. – № 6. – С. 71 – 82.
2. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
3. Murray J.W., Top Z., Özsoy E. Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea // Deep-Sea Res. – 1991. – 38, part A, suppl. 2. – P. S663 – S689.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова и Э.И. Альтмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 430 с.
5. Еремеев В.Н., Ефимов В.В., Суворов А.М. и др. Аномальная климатическая тенденция изменения температуры Черного моря // Доп. НАН Украины. – 2001. – № 11. – С. 91 – 96.
6. Tsimplis M.N., Josey S.A., Rixen M. et al. On forcing of sea level in the Black Sea // J. Geophys. Res. – 2004. – 109, C08015. – doi: 10.1029/2003JC002185.
7. 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. Физика атмосферы и океана. – 2004. – 40, № 6. – С. 832 – 841.
8. 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: МГИ НАН Украины, 2005. – Вып. 12. – С. 12 – 21.
9. 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.
10. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability // The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry. – Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2008. – 5, part Q. – P. 255 – 275. – doi: 10.1007/698\_5\_067.
11. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J. et al. Interannual variability of sea surface height over the Black Sea: relation to climatic patterns // Earth Interactions. – 2008. – 12, paper № 10. – P. 1 – 11. – doi: 10.1175/2008EI259.1.
12. Belokopytov V. Long-term variability of cold intermediate layer renewal conditions in the Black Sea // NATO ASI ser.: Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea / Eds. L. Ivanov, T. Oguz. – Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998. – 2/47. – P. 47 – 52.
13. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и начале XXI вв. // Доп. НАН Украины. – 2011. – № 9. – С. 103 – 110.
14. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // J. Mar. Syst. – 2006. – 60, iss. 3 – 4. – P. 235 – 254.
15. 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.
16. Ратнер Ю.Б., Толстошеев А.П., Холод А.Л. и др. Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 3. – С. 50 – 67.
17. <http://www.usgoda.gov/argo/argo.html>.
18. <http://poet.jpl.nasa.gov/>.
19. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 287 с.
20. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 51 – 65.

21. *Nardelli B.B., Colella S., Santoleri R. et al.* A re-analysis of Black Sea surface temperature // *J. Mar. Sys.* – 2010. – 79, iss. 1 – 2. – P. 50 – 64.
22. *Плотников Е.В., Ратнер Ю.Б.* Сопоставление температуры поверхности Черного моря, полученной по данным ИСЗ NOAA, с измерениями дрейфтеров в 2005 – 2006 годах // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 115 – 118.
23. *Rixen M., Beckers J.-M., Levitus S. et al.* The Western Mediterranean deep water: a proxy for climate change // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – 32, L12608. – doi:10.1029/2005GL022702.
24. *Ильин Ю.П., Ренетин Л.И.* Вековые изменения температуры воздуха в Черноморском регионе и их сезонные особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – Вып. 14. – С. 433 – 448.
25. *Tuzhilkin V.S.* Thermochaline structure of the sea // *The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry.* – Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2008. – 5, part Q. – P. 217 – 253. – doi: 10.1007/698\_5\_077.
26. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 209 с.
27. *Ilyin Y.P.* Observed long-term changes in the Black Sea physical system and their possible environmental impacts // *Climate Forcing and its Impacts on the Black Sea Marine Biota.* – CIESM Workshop Monogr. – 2009. – №. 39. – P. 35 – 43.
28. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Многолетняя изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем по данным реанализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 24. – С. 182 – 189.

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

Материал поступил  
в редакцию 04.04.12  
После доработки 31.05.12

**АНОТАЦІЯ** За даними контактних та супутникових вимірювань з середини минулого століття до теперішнього часу побудовано усереднені за десятирічні періоди поля температури та солоності на стандартних горизонтах в Чорному морі в шарі 0 – 500 м та описано характеристики їх просторово-часової мінливості. У верхньому шарі моря 0 – 50 м міждесятилітня мінливість температури являє собою низькочастотні коливання, розмах яких на поверхні моря досягає 1°C в зимові місяці та 2°C – у літні. Ці коливання синфазні з коливаннями температури повітря, період яких складає 60 – 70 років. У мінливості солоності у верхньому шарі присутня негативна тенденція, яка становить –0,04‰/10 років, на тлі якої виділяються коливання з періодом 20 – 30 років та розмахом до 0,2‰. В області пікнокліну температура й солоність ростуть зі швидкістю до 0,02°C/10 років та 0,05‰/10 років відповідно.

**Ключові слова:** Чорне море, температура, солоність, десятирічна мінливість.

**ABSTRACT** Decadal temperature and salinity fields at standard levels (0 – 500 m layer) in the Black Sea are constructed using in-situ data and satellite measurements obtained from the 50ies (XX century) up to now. The characteristics of their spatial and temporal variability are described. In the upper sea layer (0 – 50 m) the decadal temperature variability is characterized by low-frequency quasi-periodic oscillations whose amplitudes on the sea surface reach 1°C in winter and 2°C – in summer. These oscillations are synphased with air temperature oscillations whose period is 60 – 70 years. Variability of salinity in the upper layer shows a negative trend (–0.04‰/10 yr) against whose background the oscillations with a period 20 – 30 years and an amplitude 0.2‰ are distinguished. In the pycnocline both temperature and salinity grow with a rate up to 0.02°C/10 yr and 0.05‰/10 yr, respectively.

**Keywords:** Black Sea, temperature, salinity, decadal variability.