

В. С. ТУЖИЛКИН*, Н. А. БЕРЛИНСКИЙ**, А. Н. КОСАРЕВ***,
Ю. Р. НАЛБАНДОВ****

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕТНИХ ТЕРМОХАЛИННОЙ И КИСЛОРОДНОЙ СТРУКТУР ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

В результате климатолого-статистического анализа архивных данных судовых наблюдений температуры, солености и растворенного кислорода в северо-западной части Черного моря за 1963 - 1992 гг. выявлены значительные изменения их летних среднееголетних значений между первой и второй половинами рассмотренного интервала лет, благоприятствующие развитию здесь в 1978 - 1992 гг. придонной гипоксии. Рассмотрены внутренние физико-океанологические причинно-следственные связи между многолетними вариациями этих характеристик. Обсуждаются их возможные связи с внешними климатообразующими факторами. Выдвинута гипотеза о циркуляционном механизме выявленных многолетних изменений.

Исследования межгодовой изменчивости состояния вод морей и океанов занимают одно из ведущих мест в современной океанологии. Можно назвать, по крайней мере, две причины повышенного интереса к этой проблеме, которые взаимно дополняют друг друга. Во-первых, это – весьма значительно выросшие в последние годы компьютерные возможности сбора, хранения, анализа и интерпретации больших объемов количественных данных, во-вторых – растущее понимание прикладной значимости данной проблемы. Не случайно в большинстве крупных современных международных проектов, связанных с океаном и атмосферой (WOCE, TOGA, CLIVAR, TOPEX и др.), исследование межгодовой (многолетней) изменчивости этих сред является главной задачей. Этому способствуют успехи спутниковой (инфракрасной, альтиметрической, дрейферной) океанологии, сделавшие реальностью многолетний мониторинг климатических вариаций состояния верхнего слоя всего Мирового океана.

Межгодовая изменчивость в океанах и морях представляет собой суперпозицию процессов двух типов: 1) квазипериодических (но не вполне гармонических) колебаний, охватывающих значительные части акватории Мирового океана и 2) довольно быстрых (в течение 1 – 3 лет) переходов от одного квазистационарного состояния к другому в отдельных регионах. Самый известный пример процессов 1-го типа – цикл Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК) (см., напр., [10, 11]) Краткий обзор событий 2-го типа, наблюдавшихся в последние два десятилетия в Северной Атлантике, Средиземном, Японском и Каспийском морях, содержится в [14]. Особенно примечательна в этом отношении вторая половина 1970-х годов, когда многие крупномасштабные процессы в Мировом океане и глобальной атмосфере существенно изменили свой характер. В частности, многолетнее уменьшение индексов западной формы атмосферной циркуляции Северного полушария по Вангенгейму и Восточно-Атлантического колебания в эти годы сменилось на столь же многолетнее их увеличение, резко и кардинально уменьшились значения индексов ЭНЮК и повторяемости антициклонов над южной частью Европы (включая бассейн Черного моря) [7, 10], в Средиземном и Черном морях повсеместно началось повышение поверхностной температуры воды [5, 10], в Каспийском море – повышение уровня его поверхности [10] и понижение солености воды [13, 14].

Северо-западную часть Черного моря (СЗЧМ), как и многие другие мелководные приустьевые акватории, можно назвать «горячей точкой» климатических вариаций Мирового океана. В одном из первых исследований межгодовой изменчивости гидрометеорологических (за 1923 – 1976 гг.) и термохалинных (за 1957 – 1976 гг.) характеристик СЗЧМ [4] были выявлены основные энергонесущие периоды (2.5, 3 – 5 и около 15 лет) этого процесса, а также установлены некоторые парные регрессионные связи, в частности между годовыми объемами речного стока (Q), уровня моря и солености (S) поверхностных вод. Вместе с тем, были отмечены сложность и неоднозначность (большой размах вариаций при нестабильности их амплитудных и фазовых параметров) межгодовой

изменчивости большинства из рассмотренных характеристик, которые не позволили надежно выделить в поверхностном слое линейные тренды и регрессии в рядах небольшой продолжительности.

В исследовании [1] специальное внимание было уделено именно оценкам линейных трендов месячных величин стоков рек, температуры (Т) и солёности воды за 1948 – 1982 гг. Некоторое увеличение длины рядов характеристик и их дифференциация по месяцам позволили установить статистически значимые положительные тренды в годовом стоке Дуная и зимнем стоке Днепра, отрицательные тенденции в поверхностной среднегодовой и зимней солёности, по данным наблюдений на гидрометстанции (ГМС) г. Одесса. В центре северо-западной части достоверная (положительная) тенденция была установлена лишь для солёности на горизонте 50 м, ранее обнаруженная в глубоководной части Черного моря [3].

В работе [2] по данным наблюдений в Одесском заливе был рассмотрен существенно больший набор характеристик, возросла длина рядов (с 1948 по 1994 гг.). Спектральные оценки подтвердили преобладание названных выше периодов изменчивости. Среднегодовые значения солёности на ГМС Одесса, летние средние по вертикали значения температуры воды и придонные концентрации растворенного кислорода (O_2) стабильно уменьшались с начала 1960-х годов до 1978 г.: S – с 15.3 до 13.5 ‰, T – с 20.5 до 18.5°C, O_2 – с 3.7 до 1.0 мл/л (т. е. до гипоксических значений). Последующее изменение этих тенденций на противоположные, однако, было довольно нечетким.

В последние годы для исследований межгодовой изменчивости состояния вод океанов и морей характерны попытки установления связей локальных морских процессов с глобальными атмосферными. Например, в Каспийском море такого рода дальние связи исследовались относительно уровня его поверхности [10], в СЗЧМ аналогичное исследование [11] выполнено для многолетних изменений речного стока и T, S-характеристик, полученных по архивным данным судовых наблюдений в приустьевых областях Днепра и Дуная. Следует отметить, что в судовых наблюдениях в открытом море названные выше тенденции практически не прослеживаются [4, 11]. Вместе с тем, было установлено, что 3 – 5-летние вариации всех рассмотренных характеристик СЗЧМ имеют дальние связи с глобальным циклом ЭНЮК. Они осуществляются через модуляцию этим циклом другого крупномасштабного Северо-Атлантического колебания, которое определяет положение и интенсивность основных центров действия атмосферы (Азорского антициклона и Исландского циклона), влияющих на климат бассейна рек, впадающих в СЗЧМ. Изменчивость этих центров с периодами 10 – 20 и 40 – 60 лет, имеющая разное происхождение, также генерирует соответствующие вариации состояния вод СЗЧМ [11].

Цель настоящей статьи – выявление наиболее низкочастотной моды многолетней изменчивости температуры, солёности и растворенного кислорода в водах СЗЧМ в теплую половину года (май – октябрь) и оценка ее пространственной структуры по архивным данным судовых наблюдений в период максимальной плотности их выполнения (1963 – 1992 гг.). Некоторый опыт такого рода исследований был приобретен авторами на примере мелководной северной части Каспийского моря [13], где были установлены статистически значимые различия структур летних термохалинных полей, средних за периоды падения и подъема уровня его поверхности в последние десятилетия. Предварительный анализ данных показал (см. ниже), что в СЗЧМ также можно разделить рассматриваемый интервал лет на два равных отрезка (1963 – 1977 и 1978 – 1992 гг.). Априори, при таких масштабах осреднения доминирующими внутренними факторами, определяющими особенности многолетних вариаций гидролого-гидрохимического состояния вод, становятся эффекты вертикальной термохалинной (плотностной) стратификации вод, поскольку влияние более изменчивой адвекции вод течениями значительно сглаживается. Тем не менее, в статье сделан вывод, что представленные ниже результаты могут быть интерпретированы именно с точки зрения долговременных аномалий общей циркуляции вод СЗЧМ.

Материал и методы. Информационная основа исследования состоит из архивных банков данных судовых наблюдений вертикальных профилей значений (на 2-х и

более горизонтах): а) температуры (Т) и солёности (S) [6], включающего в текущей версии более 106 тысяч пар отредактированных Т,S-профилей по всей акватории Чёрного моря [16]; б) Т, S и растворённого кислорода (O₂) [9], включающего более 24 тысяч триад Т,S,O₂-профилей по всей акватории, в) более 1100 триад Т,S,O₂-профилей, полученных во время экспедиций Одесского отделения ИнБЮМ в северо-западной части моря в 1977 – 1992 гг. Фрагменты этих банков, относящиеся к СЗЧМ, содержат более 34 тысяч пар Т,S-профилей (севернее 44.2°с.ш. и западнее 34.0°в.д.) и около 5 тысяч триад Т,S,O₂-профилей (севернее 45.2°с.ш. и западнее 32.5°в.д.).

На выбранный 30-летний интервал лет (1963 – 1992 гг.) приходится 70 – 75 % всех имеющихся данных. В частности, с мая по сентябрь 1963 – 1977 гг. (1978 – 1992 гг.) он обеспечен данными о 8.3 (8.9) тысячах пар Т,S-профилей и 1.9 (1.2) тысячах триад Т,S,O₂-профилей.

Все использованные данные были подвергнуты тщательной редакции (программной и экспертной) в соответствии с [6].

С каждого Т-(S-, O₂-) профиля для дальнейшей обработки и анализа отбирались значения на верхнем (0 м) и нижнем горизонтах при условии, что последний составлял не менее 0.70 локальной глубины места в пределах изобаты 20 м. С увеличением глубины места до 50 м этот критерий возрастал до 0.85. За пределами изобаты 50 м вместо придонных отбирались значения на горизонте 50 ± 5 м. В случае невыполнения названных выше критериев профиль исключался из рассмотрения. Общее число таких случаев составило около 40 %. Для каждой отобранной пары Т,S-профилей определялась величина среднего вертикального градиента плотности (G) по формуле $G = \Delta\rho / \Delta z$, где $\Delta\rho$ – разность потенциальной плотности в слое между нижним и верхним горизонтом толщиной Δz .

Все отобранные данные подвергались климатолого-статистическому анализу для последовательного получения средних месячных значений за конкретные годы, 5- и 15-летние интервалы в сферических трапециях со сторонами 6 минут по широте и 8 минут по долготе для Т и S, и 12x16 минут для O₂. Затем проводилось восстановление соответствующих полей характеристик в узлы названных выше регулярных сеток в соответствии с технологией, описанной в [6].

Результаты. На рис. 1 и 2 представлены развертки всех отобранных значений рассматриваемых характеристик в исследуемом регионе по годам в августе. Жирными точками показаны их средние годовые значения, а линиями – средние и стандартные отклонения за выбранные 15-летние интервалы (1963 – 1977 и 1978 – 1992 гг.). Главным объектом настоящего анализа являются придонные концентрации O₂. Ближайшими к ним в обратной цепочке связей (от следствия к причине) являются вертикальные градиенты плотности, а далее уже значения температуры и солёности на поверхности и у дна. Именно в такой последовательности они представлены на рис. 1 и 2.

Наиболее заметная особенность рис. 1 – довольно резкое понижение среднего уровня значений O₂ в 1976 – 1979 гг. (рис. 1б). Об этом свидетельствуют не только средние за 15 лет, но и среднегодовые значения O₂, которые в 1963 – 1977 гг. ни разу не опускались ниже многолетней нормы последующего периода, а в 1978 – 1992 гг. также ни разу не превышали многолетней нормы предыдущего периода. Это стало главным основанием для разделения на такие же 15-летние интервалы и других рассматриваемых характеристик.

Аналогичные многолетние изменения O₂ характерны и для других месяцев теплого полугодия в СЗЧМ (табл. 1). 15-летние средние значения O₂ статистически различимы (т. е. превышают среднеквадратическую сумму стандартных погрешностей 5 %-го уровня значимости) во все рассматриваемые месяцы, кроме мая, когда разности средних и погрешности приблизительно равны. Наибольшие различия достигаются в августе, который и был выбран для дальнейшего анализа.

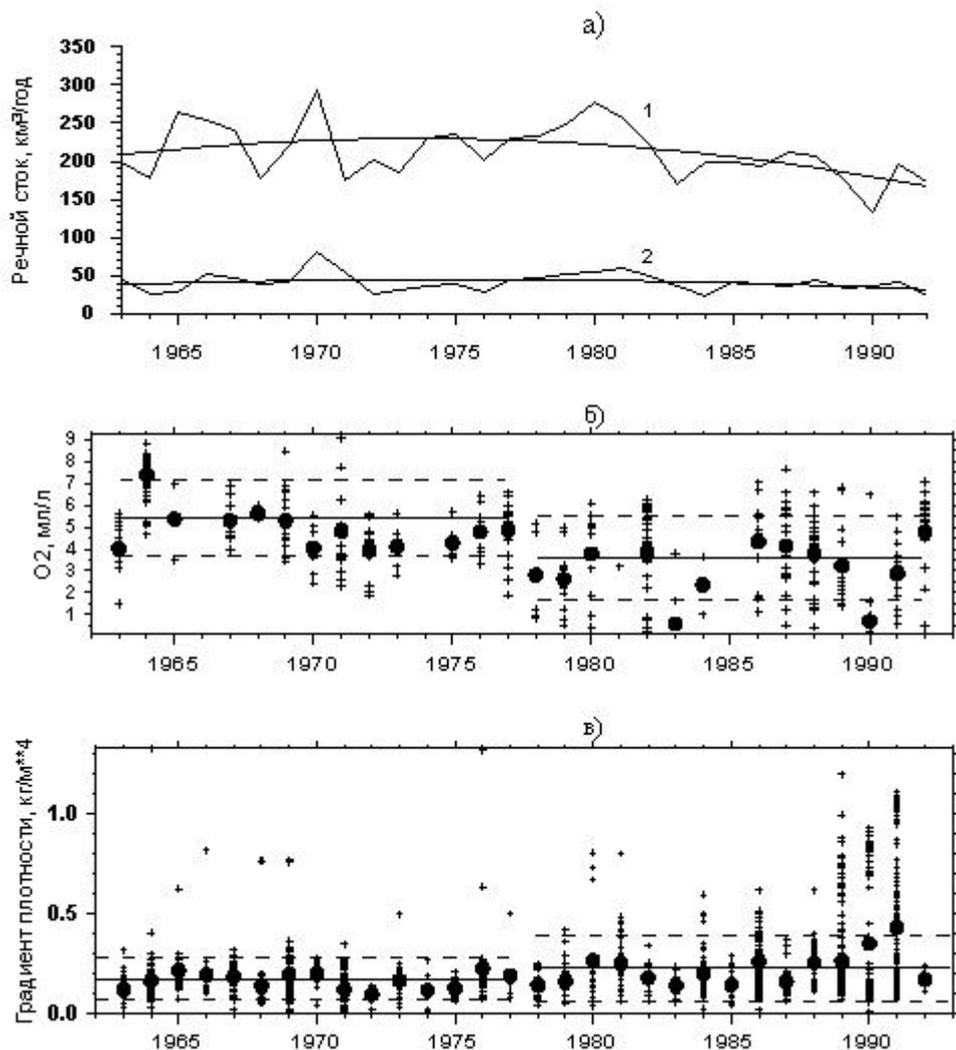


Рисунок 1. Временные ряды и диаграммы многолетней изменчивости: а) годовых объемов (км^3) стока р. Дунай (1) и Днепр (2), б) придонных концентраций растворенного кислорода (мл/л) и в) среднего вертикального градиента плотности (кг/м^4) всей толщи вод в северо-западной части Черного моря по данным судовых наблюдений в августе.

На рис. 1а показаны квадратичные тренды стоков рек. Жирные точки – средние значения по годам, сплошные горизонтальные линии – средние значения, штриховые линии – пределы стандартных отклонений за 1963 – 1977 и 1978 – 1992 гг.

Figure 1. Temporal lines and diagrams of long term changing: а) annuals Danube runoff (км^3) (1) and Dnieper (2), б) near bottom dissolved oxygen concentrations (ml/l) and в) average vertical density gradient (кг/м^4) in water column of Northwestern part of the Black Sea in August.

In figure 1a quadratic trends of the rivers runoff are shown. Bold points are average meanings according the years, solid horizontal lines are average meanings, stroke lines are limits of standard deviation during the 1963 – 1977 and 1978 – 1992

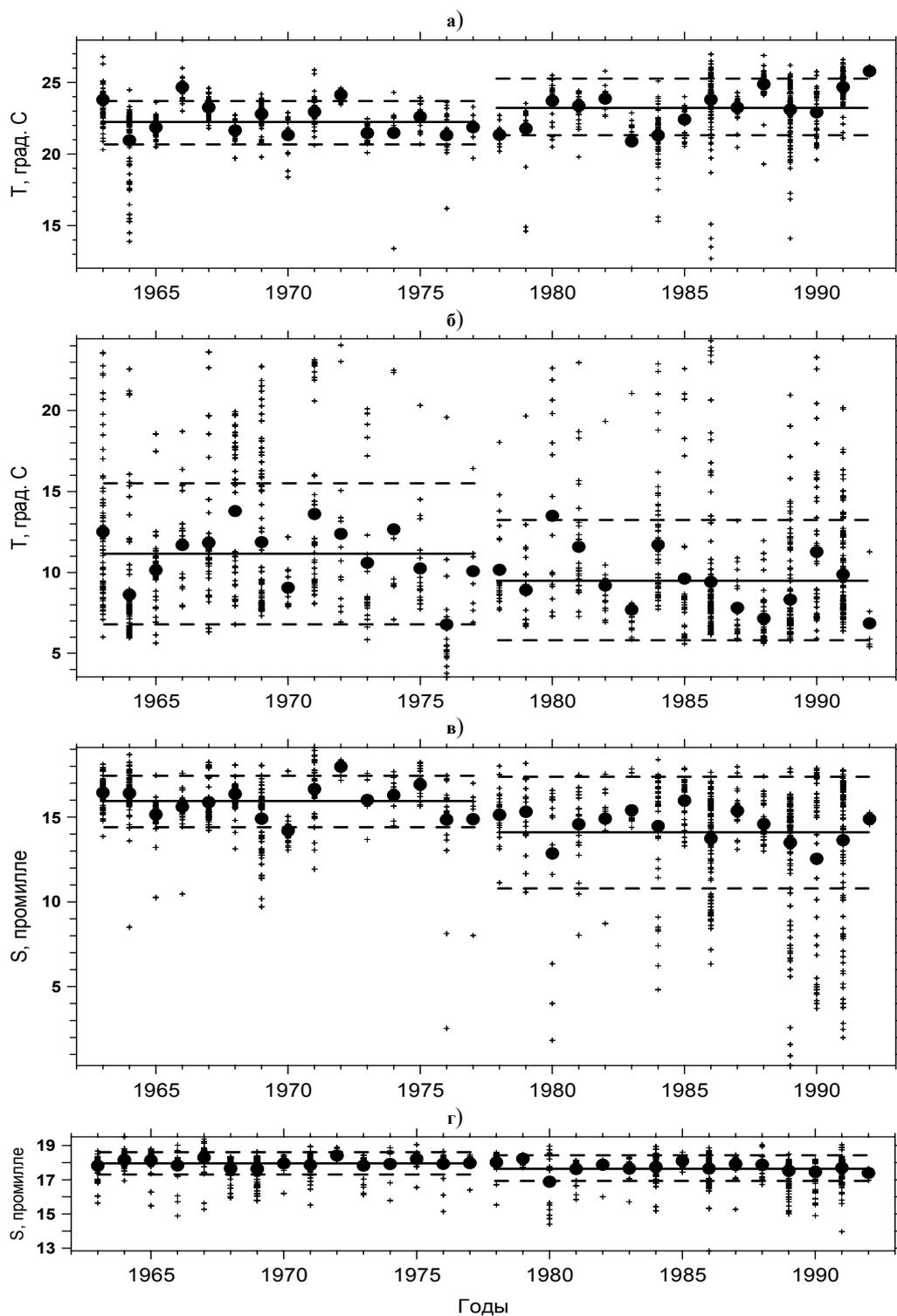


Рисунок 2. Диаграммы многолетней изменчивости: а, б) температуры ($^{\circ}\text{C}$) и в, г) солёности ($\%$) поверхностного (а, в) и придонного (б, г) слоев вод северо-западной части Черного моря по данным судовых наблюдений в августе (обозначения см. на рис. 1)
 Figure 2. Long term changing diagrams of: а, б) temperature ($^{\circ}\text{C}$), and в, г) salinity ($\%$) on the surface (а, в) and near bottom water layer (б, г) in the Northwestern part of the Black Sea Shipping Data base sampling in August (see legend in figure 1)

Таблица 1. Средние значения, среднеквадратические отклонения (СКО) и стандартные погрешности (СП) концентраций растворенного кислорода (мл/л) в придонном слое, а также среднего вертикального градиента плотности (кг/м^4) толщи вод от поверхности до дна северо-западной части Черного моря в теплую половину года в 1963 – 1977 и 1978 – 1992 гг.

Table 1. Average meanings, root-mean-square deviations (СКО) standard faults (СП) of dissolved oxygen concentrations (ml/l) in the bottom layer, and also average vertical density gradient (kg/m^4) in the water column from the surface to the bottom during the hot period 1963 –1977 and 1978 – 1992

Месяц	1963 - 1977 гг.				1978 - 1992 гг.			
	N	Среднее	СКО	СП	N	Среднее	СКО	СП
Растворенный кислород в придонном слое, мл/л								
Май	214	6.882	± 1.324	± 0.180	107	6.413	± 1.693	± 0.328
Июнь	90	5.961	± 1.642	± 0.346	54	4.939	± 1.431	± 0.386
Июль	158	5.450	± 1.593	± 0.252	157	3.890	± 1.909	± 0.304
Август	147	5.449	± 1.728	± 0.286	176	3.606	± 1.915	± 0.288
Сентябрь	102	4.919	± 1.746	± 0.346	52	3.777	± 1.986	± 0.552
Октябрь	127	5.652	± 1.421	± 0.252	192	4.766	± 1.745	± 0.250
Средний вертикальный градиент плотности, кг/м^4								
Май	814	0.164	± 0.276	± 0.019	869	0.214	± 0.170	± 0.013
Июнь	727	0.249	± 0.232	± 0.022	767	0.301	± 0.311	± 0.022
Июль	621	0.214	± 0.135	± 0.012	638	0.243	± 0.201	± 0.016
Август	836	0.174	± 0.112	± 0.008	869	0.228	± 0.166	± 0.012
Сентябрь	610	0.134	± 0.153	± 0.017	625	0.153	± 0.162	± 0.013
Октябрь	797	0.111	± 0.211	± 0.018	856	0.104	± 0.378	± 0.028

Таблица 2. Средние значения, СКО и СП: годовых сумм стока ($\text{км}^3/\text{год}$) Дуная (Q_1) и Днепра (Q_2), температуры (T , $^{\circ}\text{C}$), солености (S , ‰) и концентраций растворенного кислорода (O_2 , мл/л) в поверхностном (индекс s) и придонном (индекс h) слоях, а также среднего вертикального градиента плотности (G , кг/м^4) толщи вод от поверхности до дна северо-западной части Черного моря в августе 1963 - 1977 и 1978 - 1992 гг.

Table 2. Average meanings, root-mean-square deviations (СКО) standard faults (СП) annual sums of Danube runoff (Q_1) and Dnieper (Q_2), temperature (T , $^{\circ}\text{C}$), salinity (S , ‰) and dissolved oxygen concentrations (O_2 ml/l) on the surface (indexes s) and near bottom layer (indexes h) and also average vertical density gradient (G , kg/m^4) in the water column from the surface to the bottom during the hot period 1963 - 1977 and 1978 - 1992

Характеристика	1963 - 1977 гг.				1978 - 1992 гг.			
	N	Среднее	СКО	СП	N	Среднее	СКО	СП
Q_1	15	219.3	33.8	17.4	15	206.4	36.2	18.7
Q_2	15	40.8	13.3	6.9	15	40.3	9.9	5.1
T_s	836	22.258	± 1.675	± 0.116	869	23.334	± 1.976	± 0.134
T_h	836	11.116	± 4.423	± 0.306	869	9.538	± 3.707	± 0.256
S_s	836	15.664	± 1.545	± 0.105	869	14.460	± 3.327	± 0.239
S_h	836	17.949	± 0.661	± 0.045	869	17.697	± 0.733	± 0.052
G	836	0.174	± 0.112	± 0.008	869	0.228	± 0.166	± 0.012
O_{2h}	147	5.449	± 1.728	± 0.286	176	3.606	± 1.915	± 0.288

Примечание: средняя глубина залегания придонных значений и ее СКО в 1963 - 1977 гг. составили 23.6 ± 9.6 м, в 1978 - 1992 гг. - 25.4 ± 11.6

Notice: average depth and average meanings, root-mean-square deviations in 1963 - 1977 were 23.6 ± 9.6 m, в 1978 - 1992 - 25.4 ± 11.6

Для других рассматриваемых характеристик также выявлены достоверные различия между двумя многолетними периодами (рис. 1 и 2, табл. 1 и 2), хотя в сравнении с O_2 они выглядят менее ярко и имеют некоторые фазовые сдвиги. Средний градиент плотности с мая по август в 1978 – 1992 гг. был на 20 – 25 % больше, чем в 1963 –

1977 г., а в сентябре и октябре многолетние различия оказались статистически незначимы (табл. 1). Столь существенное повышение статической устойчивости вод в 1978 – 1992 г. было обусловлено сразу несколькими причинами. Прежде всего, это – более существенное уменьшение поверхностной солености, по сравнению с придонной, а также одновременное повышение поверхностной и понижение придонной температуры воды (рис. 2). Данные табл. 2 свидетельствуют, что все названные многолетние различия в августе в СЗЧМ были статистически значимы. Вклад соленостных (термических) эффектов в увеличение средних многолетних градиентов плотности вод СЗЧМ в 1978 – 1992 г. составил 65 % (35 %).

На рис. 3 – 5 представлены средние за 15-летние интервалы августовские поля рассмотренных характеристик, поля разностей между вторым и первым интервалом, а также поля отношений этих разностей к среднеквадратической сумме стандартных погрешностей 5 %-й значимости. В областях, где модуль этого отношения больше единицы, различия многолетних значений статистически значимы. Дополнительно на рис. 4а,б показано распределение средних в сферических трапециях значений, обеспеченных наблюдениями не менее, чем в двух пятилетиях, каждое из которых, в свою очередь, имеет данные не менее чем за 3 года. Такие значения можно считать более или менее достоверными. Их доля в суммарном числе трапеций составила около 40 %. Менее обеспеченные данными трапеции принимались в расчет, если они отличались от средних по акватории значений не более чем на 2 стандартных отклонения (см. табл. 2). В целом, за исключением Каркинитского залива и крайнего юго-западного участка, рассматриваемая акватория достаточно равномерно обеспечена достоверными оценками.

Наиболее крупные черты конфигурации гидрологических полей на рис. 3д, е и 4 были достаточно стабильны в течение всего рассмотренного 30-летнего интервала времени. В отношении полей придонных концентраций O_2 ситуация несколько иная (рис. 3а, б). В частности, в 1978 – 1992 г. (рис. 3б) вдоль западного и северного берегов сформировалась сплошная полоса шириной 50 – 80 км с придонными концентрациями O_2 , меньшими 4.0 мл/л (ПДК для рыбохозяйственных водоемов). При этом в областях минимумов O_2 вблизи устьев Днестра и Дуная концентрации уменьшились до гипоксических значений (менее 3.0 мл/л). Лишь на наиболее глубоководном участке акватории многолетние изменения O_2 практически отсутствовали. Определенную роль в этом могло сыграть увеличение в 1978 – 1992 г. средних градиентов плотности в названных областях в 1.5 – 2 раза (рис. 3д - ж). В результате в 1978 – 1992 г. конфигурации полей придонных концентраций O_2 (рис. 3б) и средних градиентов плотности (рис. 3е) стали довольно близкими. В частности, положение изолиний 4.0 мл/л на рис. 3б и 1 кг/м⁴ на рис. 3е практически совпадает.

Слагаемые существенного увеличения среднего градиента плотности у западного берега СЗЧМ в 1978 – 1992 г. показаны на рис. 5. Безусловно, главным фактором является весьма серьезное здесь в эти годы уменьшение поверхностной солености, в отдельных областях более чем на 1 ‰ (рис. 5д). Характерно, что области СЗЧМ, где соленость в 1978 – 1992 г. увеличилась, практически совпали с областями уменьшения среднего градиента плотности (ср. рис. 5д и 3ж). Следующими по значению факторами были локальные понижения в 1978 – 1992 г. придонной температуры (рис. 5в) и повышения придонной солености (рис. 5ж). В прибрежных областях СЗЧМ, примыкающих к Жебриянскому, Днестровскому и Днепро-Бугскому лиманам, эти факторы взаимно дополняли друг друга, что привело к особенно значительным здесь приращениям среднего градиента плотности (см. рис. 5ж).

В целом, конфигурация полей многолетних изменений T и S в придонном слое наиболее сложна и не поддается однозначной интерпретации. Наименьшее значение в рассматриваемом контексте имеет повышение поверхностной температуры воды в 1978 – 1992 г. (рис. 5а). Вместе с тем, эта тенденция наиболее обеспечена литературными подтверждениями [2, 5, 11, 15 и др.].

Обсуждение. Представленные результаты показали, что весьма значительное уменьшение придонных концентраций растворенного кислорода в 50 – 80-километровой полосе вдоль западного и северного берегов СЗЧМ в 1978 – 1992 г. имеет вполне ло-

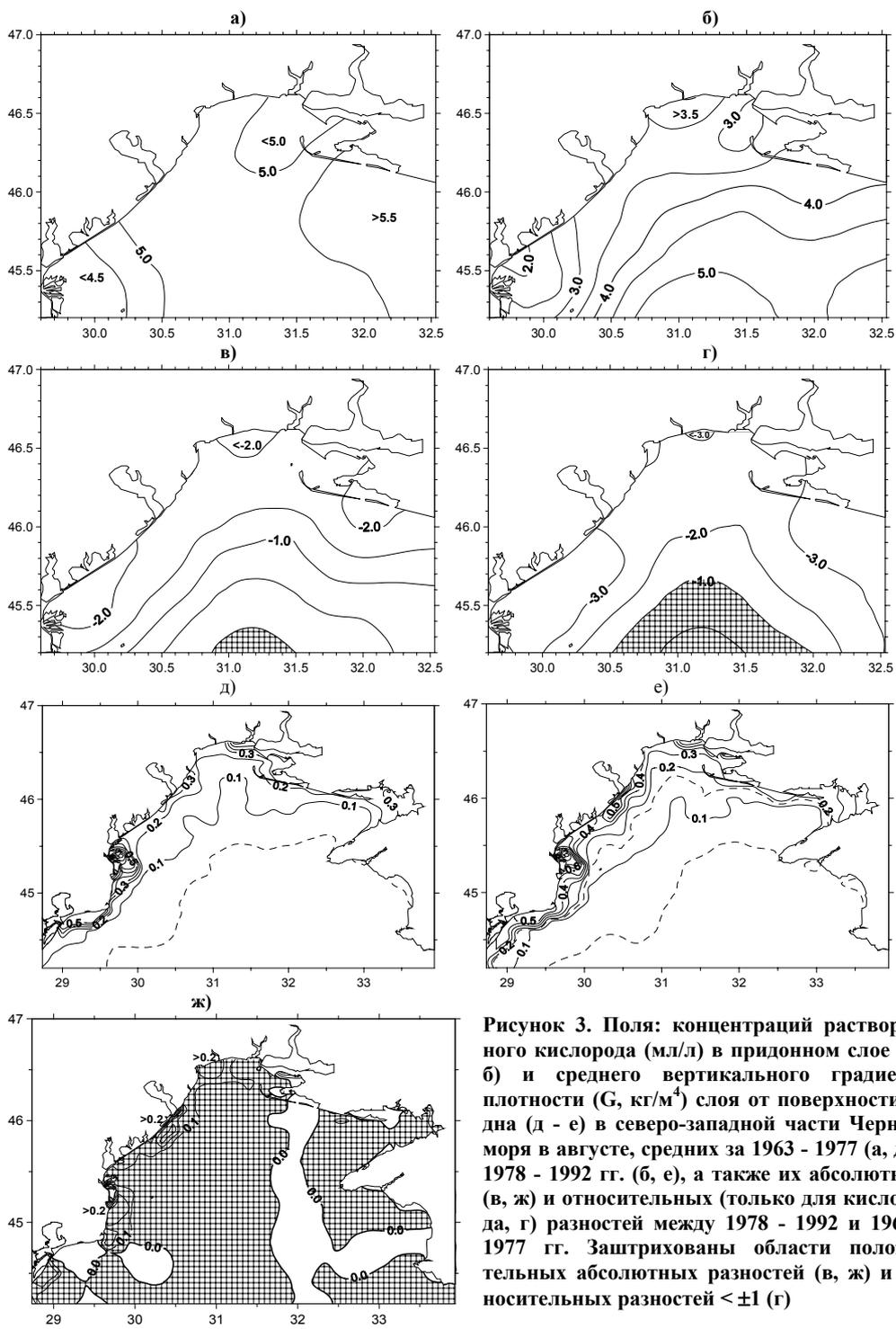


Рисунок 3. Поля: концентраций растворенного кислорода (мл/л) в придонном слое (а - б) и среднего вертикального градиента плотности (G , кг/м^4) слоя от поверхности до дна (д - е) в северо-западной части Черного моря в августе, средних за 1963 - 1977 (а, д) и 1978 - 1992 гг. (б, е), а также их абсолютных (в, ж) и относительных (только для кислорода, г) разностей между 1978 - 1992 и 1963 - 1977 гг. Заштрихованы области положительных абсолютных разностей (в, ж) и относительных разностей $< \pm 1$ (г).

Figure 3. The fields: concentrations of dissolved oxygen (ml/l) in bottom layer (a - б) and average vertical density gradient (G kg/m^4) in the water column from the surface to the bottom (д - е) in the Northwestern part of the Black sea in August, average during the period 1963 - 1977 (а, д) and 1978 - 1992 (б, е) and also their absolute and relative (just for oxygen г) difference between 1978 - 1992 and 1963 - 1977. Crosshatched regions are positive absolute differences (в, ж) and relative differences $< \pm 1$ (г).

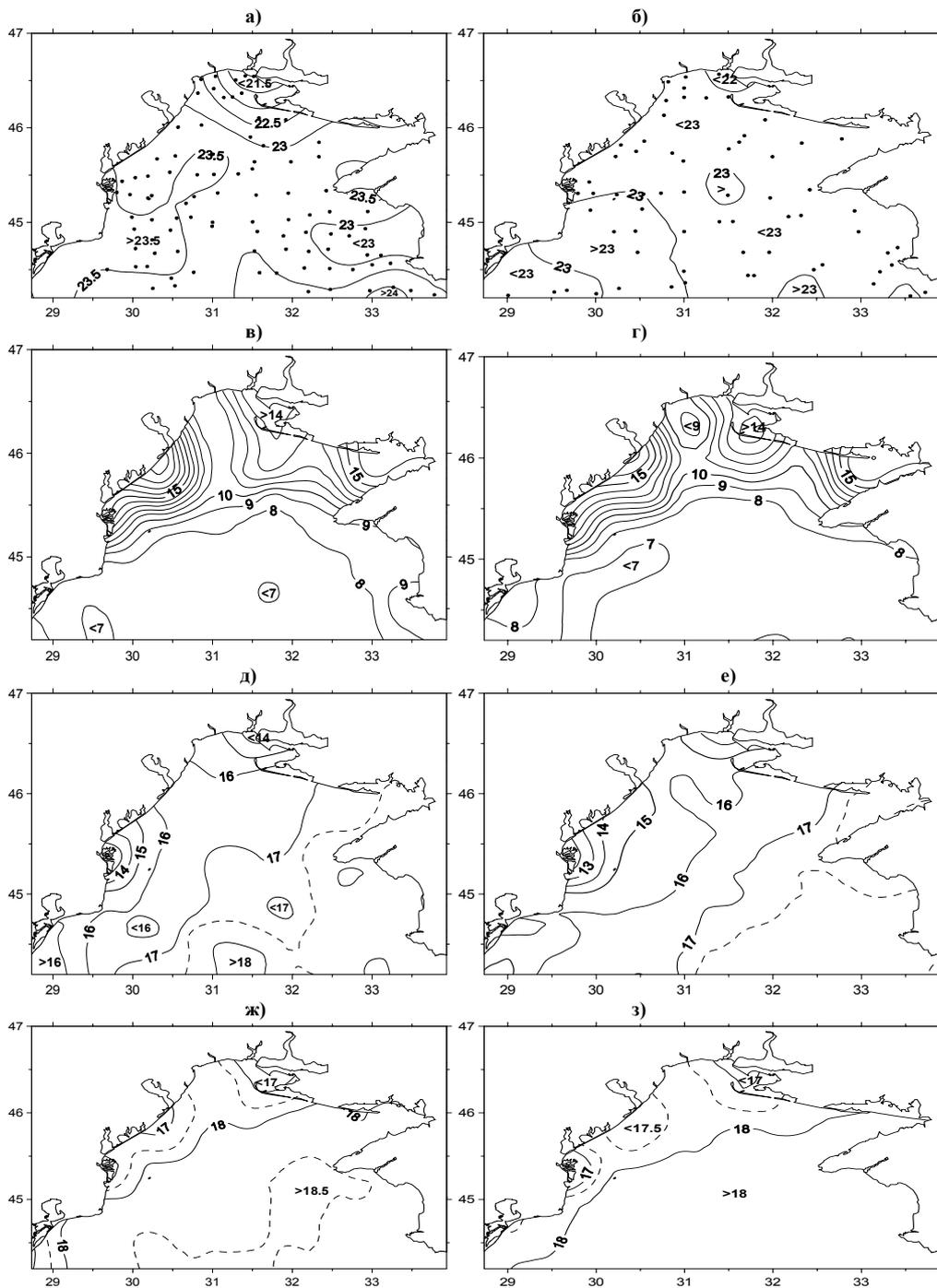


Рисунок 4. Поля: температуры ($^{\circ}\text{C}$, а - г) и солёности ($\%$, д - з) воды поверхностного (а, б, д, е) и придонного (в, г, ж, з) слоев северо-западной части Черного моря в августе, средних за 1963 - 1977 (а, в, д, ж) и 1978 - 1992 гг. (б, г, е, з) по данным судовых наблюдений (точки на рис. 4а, б - положение средних станций с повышенной обеспеченностью данными)

Figure 4. Fields: temperature ($^{\circ}\text{C}$, а - г) and salinity ($\%$, д - з) of the surface and near bottom water layers (в, г, ж, з) in Northwestern part of the Black Sea in August, average during the period 1963 - 1977 (а, в, д, ж) and 1978 - 1992 гг. (б, г, е, з) shipping Data base sampling (points in the fig. 4а, б - location of average stations with higher level Data Base)

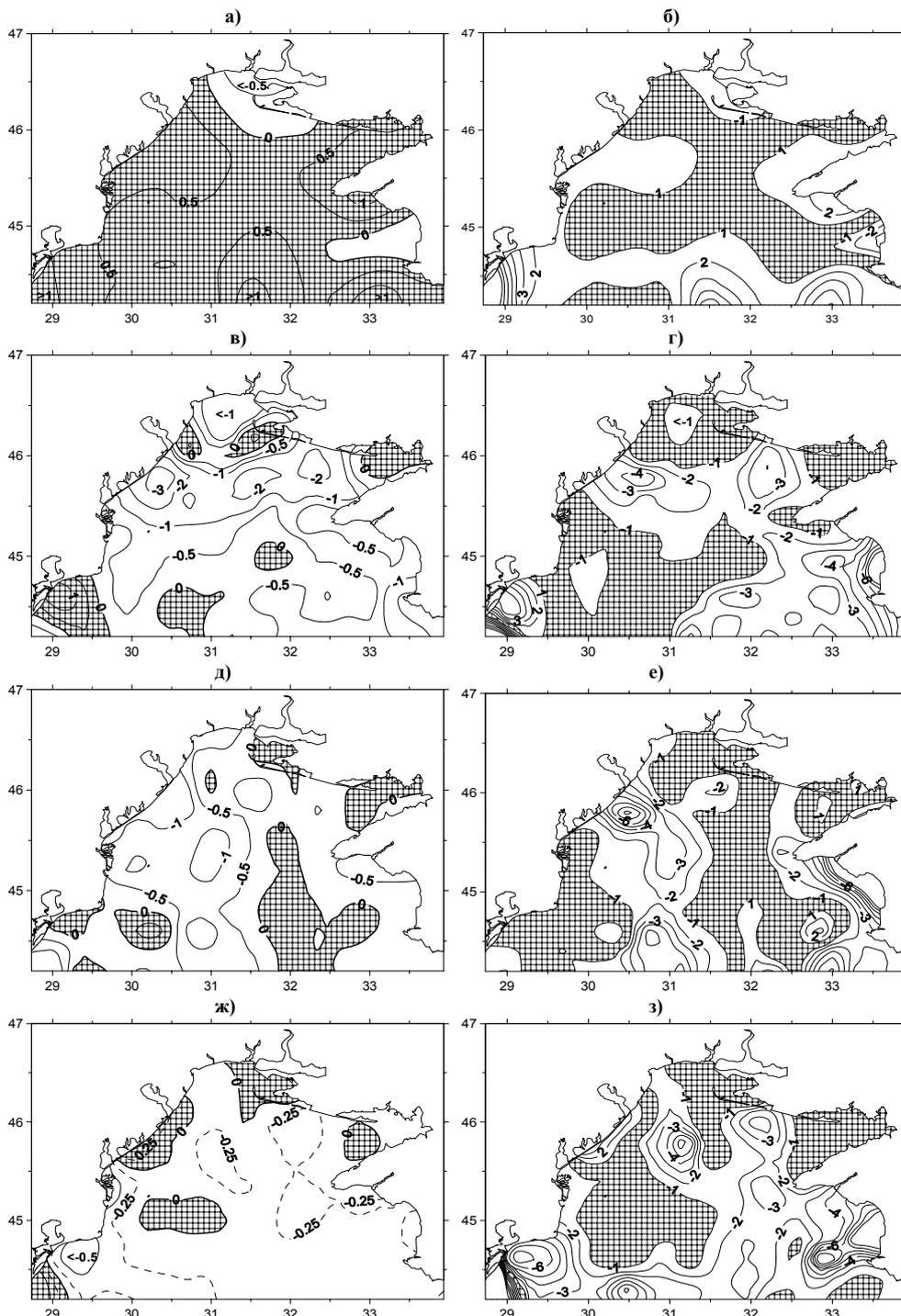


Рисунок 5. Поля: абсолютных (а, в, д, ж) и относительных (б, г, е, з) разностей температуры (°С, а - г) и солёности (‰, д - з) воды поверхностного (а, б, д, е) и придонного (в, г, ж, з) слоев северо-западной части Черного моря в августе между средними значениями за 1978 - 1992 и 1963 - 1977 гг. Обозначения см. на рис. 3

Figure 5. The fields: absolute (а, в, д, ж) and relative (б, г, е, з) difference of temperature (°С, а - г) and salinity (‰, д - з) the surface (а, б, д, е) and near bottom (в, г, ж, з) layers in the Northwestern part of the Black Sea in August between the average meanings for 1978 – 1992 and 1963 – 1977. (See legend in fig. 3)

гичную связь с одновременным увеличением статической устойчивости вод, которое, в свою очередь, было обусловлено всеми термохалинными компонентами, формирующими плотностную стратификацию (т. е. соответствующими изменениями T и S на поверхности и у дна). Вместе с повышенным поступлением органического вещества и другими биохимическими факторами это создало благоприятные условия для развития в 1978 – 1992 гг. придонной гипоксии на значительной части акватории СЗЧМ [2, 3].

Вместе с тем, дальнейшее прослеживание цепочки связей от следствия к причине показывает, что поведение главного фактора, определяющего статическую устойчивость вод – солёности, не соответствовало многолетним изменениям речного стока в СЗЧМ в рассматриваемом интервале лет (рис. 1а).

Как следует из табл. 2, речной сток в 1978 – 1992 гг. уменьшился, хотя и незначительно с точки зрения статистики. Аналогичным было поведение разности осадки-испарение в СЗЧМ, которая в 1978 – 1992 гг. была меньше, чем в 1963 – 1977 гг. [11, 12].

Таким образом, единственной причиной уменьшения солёности в СЗЧМ в 1978 – 1992 гг. могла быть определенная фаза низкочастотной моды изменчивости общей циркуляции вод СЗЧМ, которая обеспечивала повышенную концентрацию речных вод ее западной и центральной части. Модельные расчеты [8] показывают, что такие режимы возможны при ветрах с западной составляющей. В свою очередь, в [7, 10] показано, что атмосферная макроциркуляционная ситуация над южной половиной Европы в 1978 – 1992 гг. способствовала увеличению именно западных компонент переноса воздушных масс в связи с ростом западной формы циркуляции по Вангенгейму [7] и индекса Восточно-Атлантического колебания [10]. Характер изменения конфигураций изохалин от 1963 – 1977 гг. к 1978 – 1992 гг. на рис. 4д, е (смещение от устья Дуная на восток и север) довольно близок к полученному в [8] при переходе от северо-восточных ветров к северо-западным.

Отметим, что в бассейне Каспийского моря атмосферные макроциркуляционные вариации в конце XX века привели к повышенному увлажнению климата, стоку рек и распреснению приустьевых областей Северного Каспия на 2 – 3 ‰ [7, 10, 13]. Судя по речному стоку, климатическая реакция в бассейне СЗЧМ была существенно иной. Специальное рассмотрение этого вопроса – задача будущих исследований.

Заключение. Климатолого-статистический анализ архивных данных судовых наблюдений температуры, солёности и растворенного кислорода в северо-западной части Черного моря за 1963 – 1992 гг. обнаружил значительные изменения среднемноголетних значений этих характеристик между первой и второй половинами рассмотренного интервала лет. Эти изменения, статистически достоверные на 5 %-м уровне значимости как в целом по региону, так и в отдельных его частях, были согласованы между собой с точки зрения физико-океанологических причинно-следственных связей. В комплексе они сформировали благоприятные условия для развития придонной гипоксии вдоль западных и северных берегов СЗЧМ в 1978 – 1992 гг.

Временная локализация довольно быстрого перехода к такому состоянию вод СЗЧМ во второй половине 1970-х годов подтверждается опубликованными результатами исследований гидрологических условий в соседних морях и региональных атмосферных макроциркуляционных режимов. Прямые связи с речным стоком отсутствуют. Выдвинута гипотеза о циркуляционном механизме выявленных многолетних изменений, которую предстоит рассмотреть в дальнейших исследованиях этой проблемы.

1. *Альтман В. Н., Гертман И. Ф., Голубева В. А.* Многолетние тенденции солёности и температуры вод Черного моря в связи с изменениями стока рек (по данным натурных наблюдений) // Тр. ГОИН. – 1988. – Вып. 189. – С. 39 - 53.
2. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным (1981 - 2000 гг.) // Комплексные исслед. сев.-вост. части Черного моря. - М.: ИО РАН, 2002. - С. 20 - 27.
3. *Иванов В. А., Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* Экспериментальная версия компьютерного атласа климатических термохалинных характеристик Черного моря. / Иванов В.А. (ред.) Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь, МГИ НАНУ, 1999. - С. 231 - 240.

4. Мещерская А. В., Голод М. П., Белянкина И. Г. Колебания уровня Каспийского моря в связи с особенностями общей циркуляции атмосферы в XX веке / Изменения климата и их последствия. - СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – С. 180 – 194.
5. Михайлова Э. Н., Шатило Н. Б. Моделирование распространения и трансформации речных вод на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. - 1996. - № 3. - С. 30 - 40.
6. Налбандов Ю. Р. Черное море-2000: климатический атлас гидрологических и гидрохимических характеристик вод на компакт-диске. - М.: ИО РАН, 2000. - 329 с.
7. Нестеров Е. С. Низкочастотная изменчивость циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря во второй половине XX века // Метеорология и гидрология. - 2001. - № 11. - С. 27 - 36.
8. Полонский А. Б. Изменчивость гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря, вызванная крупномасштабными процессами // Метеорология и гидрология. - 1997. - № 3. - С. 59 - 70.
9. Сизов А. А., Белокопытов В. Н. О синхронизации изменчивости гидрометеорологических и гидрологических полей Черного моря в годы спада 11-летнего цикла солнечной активности / Иванов В.А. (ред.) Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – С. 86 - 93.
10. Тужилкин В. С., Косарев А. Н. Изменчивость летней термохалинной структуры вод Северного Каспия при разных уровнях режимах. // Вестник МГУ. Сер. 5. География. - 2002. - № 5. - С. 61 - 67.
11. Kosarev A. N., Tuzhilkin V. S., Kostianoy A. G. Main features of the Caspian Sea hydrology / J.C.J. Nihoul et al. (eds.). Dying and Dead Seas. - Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. - P. 159 - 184.
12. Moron V. L'évolution séculaire des températures de surface de la mer Méditerranée (1956-2000) // C. R. Geoscience. - 2003. - 335, № 9. - P. 721 - 727.
13. Tuzhilkin V., Vorontsov A. The space-time structure climatic interannual variability of the temperature and salinity fields in the main baroclinic layer of the Black Sea / Scientific and Policy challenges towards an effective management of the marine environment. Emphasis on the Black Sea and the Mediterranean Regions: Abstr. Int. Conf. (Albena, Bulgaria, October 12 - 18, 2003). - Varna, 2003. - P. 302.

* Государственный океанографический институт, Москва, Россия

**ОФ Института биологии южных морей НАН Украины, Одесса, Украина

***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

****Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Получено 07.07.2004

V. S. TUZHILKIN, N. A. BERLINSKY, A. N. KOSAREV, Yu. R. NALBANDOV

**LONG-TERM VARIABILITY OF SUMMER TERMOHALINE AND OXYGEN STRUCTURES
OF WATERS IN THE NORTHWESTERN BLACK SEA**

Summary

As a result of climatic-statistical analysis of Data base on temperature, salinity and dissolved oxygen in the northwestern Black Sea during the period 1963 – 1992 the significant changes of their long-term summertime meanings (first and second part period duration) have been revealed. It was in favor of near bottom hypoxia development in 1978 - 1992. The inner physical-oceanological links between long-term characteristics variations have been observed. Some relations with climatic factors are discussed. The hypothesis about circulation mechanism of these changes has been proposed.