

Долговременная изменчивость температуры поверхности Черного моря и ее отклик на глобальные атмосферные воздействия

А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, Н.А. Шеремет

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117851 Москва, Нахимовский пр., 36
E-mail: sheremet@ocean.ru*

Исследование характера сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности (ТПМ) Черного моря и оценка соответствующих трендов в 21-летний (1982–2002 гг.) и ~ 50-летний (для зимних ТПМ) периоды основано на использовании комбинированных данных спутниковых массивов MCSST (1982–1984 гг., недельные значения с пространственным разрешением ~ 18 км) и проекта Pathfinder (1985–2002 гг., среднемесячные значения с пространственным разрешением 9 км), а также доступных результатов гидрологических измерений разных лет. Установлено, что в 1982–2002 гг. имело место потепление моря (в среднем), с положительным трендом среднегодовой ТПМ примерно $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$, причем потепление наблюдалось во все сезоны. В пределах этого периода среднегодовая и зимняя (средняя за январь–март) температура уменьшалась в среднем в 1982–1993 гг. и увеличивалась в 1993–2002 гг. Тренд зимних (средних за февраль–март) ТПМ на временном интервале 1957–2002 гг., оцененный по опубликованным натурным и анализируемым спутниковым данным, оказался существенно меньшим, чем в 1982–2002 гг., и отрицательным ($\sim -0.008^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Отмечены различия в темпах потепления юго-западного и северо-восточного регионов моря в 1985–2002 гг. Выполненное сопоставление по времени выявленных зимних аномалий ТПМ с фазами Эль-Ниньо – Южного колебания, а также с зимними индексами североатлантического колебания и колебания Восточная Атлантика – Западная Россия свидетельствует об отклике температурного режима Черного моря на эти глобальные атмосферные воздействия.

Введение

Температура поверхности Черного моря (ТПМ) – важнейший гидрофизический параметр, определяющий теплообмен между морем и атмосферой и влияющий на циркуляцию вод и экологическое состояние этого полузамкнутого бассейна. Из-за малой толщины верхнего перемешанного слоя и особенностей плотностной стратификации его температура и ТПМ быстро реагируют на глобальные и региональные атмосферные воздействия, вследствие чего ТПМ подвержена существенной пространственной и временной изменчивости. Поэтому важно получение надежной информации о межгодовой изменчивости ТПМ и тенденции изменения во времени ее среднего (для моря в целом и его отдельных регионов) значения, особенно в связи с глобальным потеплением, наблюдающимся с конца 1970-х годов [1], и с растущей антропогенной нагрузкой на море.

Ниже представлены результаты исследования сезонной и межгодовой изменчивости ТПМ Черного моря, основанные на анализе спутниковой информации (1982–2002 гг.) и доступных гидрологических измерений разных лет (для зимнего сезона – с 1954 г.). Полученные результаты использованы для выявления отклика ТПМ на крупномасштабные атмосферные воздействия – Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), североатлантическое колебание (САК) и колебание Восточная Атлантика – Западная Россия (ВАЗР).

Исходные и обработанные массивы данных

Данное исследование основано на доступных через Интернет массивах ТПМ, создаваемых в JPL (Jet Propulsion Laboratory, США) в результате обработки измерений радиометрами AVHRR на борту спутников NOAA. Использовались два типа массивов ТПМ с разрешением по температуре 0.1°C : интерполированные средние за неделю MCSST-данные с пространственным разрешением примерно 18 км (1982–1984 гг.) и среднемесячные значения проекта Pathfinder с флагами 4–7

(«лучшие ТПМ») с пространственным разрешением около 9 км (1985–2002 гг.). При этом анализировались только ночные измерения (для исключения эффекта солнечного прогрева). Для анализа изменчивости ТПМ в зимний период с 1954 по 2002 г. привлекались также доступные результаты гидрологических измерений [2, 3].

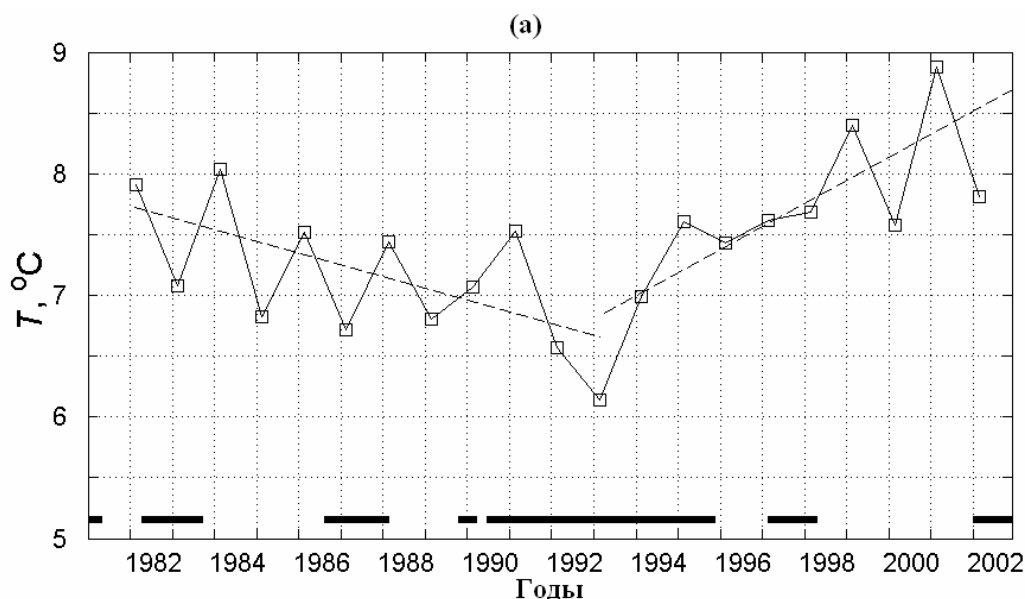
Выполненное сопоставление среднесезонных значений ТПМ в 1985–2000 гг., рассчитанных по исходным массивам MCSST и Pathfinder, показало, что среднее значение разности между ними мало для зимних и летних сезонов (не более 0.17°C , рассчитанные по MCSST-массивам значения несколько выше); для весны и осени – сезонов со значительными изменениями температуры – оно больше (по абсолютному значению) (см. [4]). При расчете среднегодовых значений температуры эти сезонные различия ТПМ, рассчитанных по массивам данных MCSST и Pathfinder, практически компенсируют друг друга.

Данные по среднемесячным индексам ЭНЮК и САК были получены через Интернет (<http://www.cpc.NOAA.gov/data/indices/soi>, <http://www.cpc.NOAA.gov/data/teledoc>); зимние (декабрь–март) индексы САК даны на сайте <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html>, индексы ВАЗР – на сайте <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawruss.html>.

Сезонная и межгодовая изменчивость ТПМ

Рис. 1–3 демонстрируют межгодовую изменчивость среднесезонных и среднегодовых значений средней для моря ТПМ в период 1982–2002 гг. Представлены два типа зимних значений ТПМ – осредненных в пределах зимнего гидрологического сезона (январь–март, рис. 1а) и двух наиболее холодных месяцев года (февраль и март, рис. 3). При построении рис. 3, охватывающего почти 5 деkad, использованы результаты гидрологических измерений [2] (1957–1983 гг.) и спутниковые данные (значение ТПМ для 1984 г. получено по MCSST-данным, с 1985 г. использовались данные массива Pathfinder).

Как следует из рис. 2, для 21-летнего периода 1982–2002 гг. в целом было характерно потепление Черного моря на 1.3°C с трендом среднегодовых температур, полученным методом линейной регрессии, $\sim 0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Потепление вод происходило во все сезоны (рис. 1), причем наибольший положительный тренд наблюдался весной и летом (0.08 и $0.09^{\circ}\text{C}/\text{год}$ соответственно), наименьший – зимой и осенью ($0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$). В пределах этого периода, однако, характер изменения зимней и среднегодовой температур и соответствующих трендов до и после холодного 1993 г. был различным (рис. 1, 2): ТПМ уменьшалась в среднем в 1982–1993 гг. и увеличивалась в 1993–2002 гг. (тренды среднегодовой температуры – соответственно -0.03 и $+0.17^{\circ}\text{C}/\text{год}$). В теплое



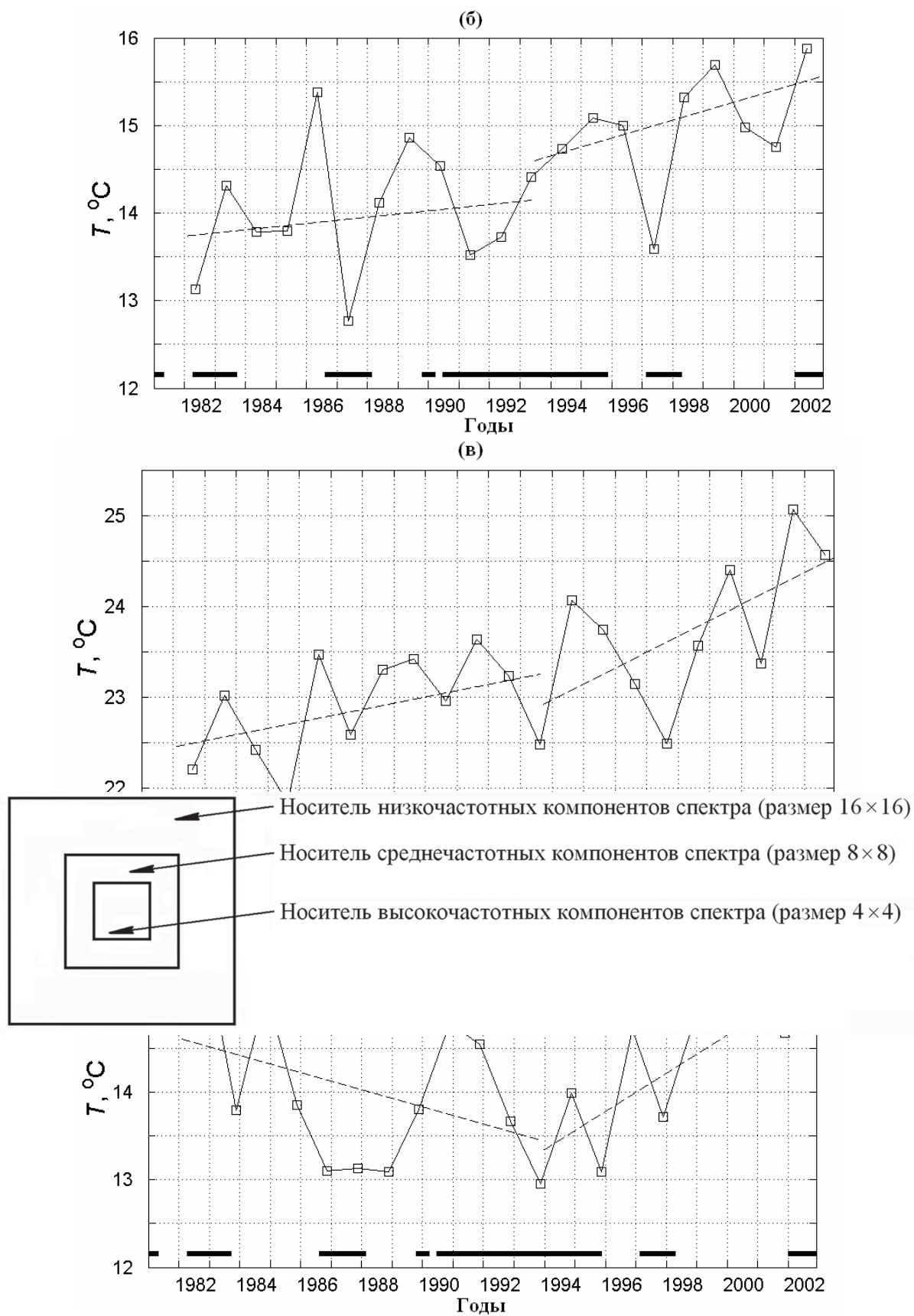


Рис. 1. Среднесезонные значения ТПМ Черного моря в период 1982–2002 гг.: зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (з). Пунктирные линии показывают тренд ТПМ в подпериоды 1982–1993 и 1993–2002 гг. Жирными отрезками на горизонтальной оси отмечены периоды Эль-Ниньо

время года наблюдался в среднем устойчивый рост ТПМ, с увеличением темпа потепления после 1993 г. по сравнению с 1982–1993 гг.

Полученные значения температурных трендов относятся к сравнительно коротким ~ 10–20-летним периодам. На больших временных интервалах картина может быть существенно иной. В настоящий момент мы располагаем сравнительно длинным рядом только осредненных за февраль–март значений ТПМ (рис. 3), с минимумом также в 1993 г. Линейная регрессия дала для подпериодов 1957–1993 гг. и 1993–2003 гг. тренды -0.03 и $+0.14^{\circ}\text{C}/\text{год}$, тогда как для периода в целом (1957–2003 гг.) тренд оказался малым и отрицательным ($\sim -0.008^{\circ}\text{C}/\text{год}$), что явилось результатом малого изменения (слабого понижения) зимних ТПМ в Черном море в 1957–1980 гг. (рис. 3).

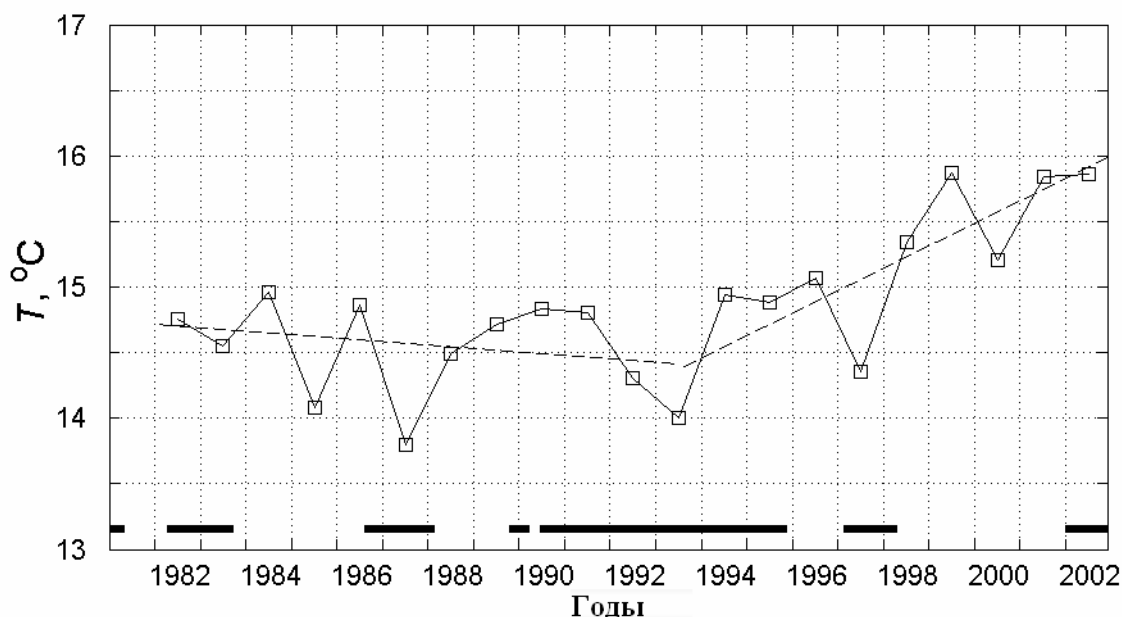


Рис. 2. Изменение среднегодовых значений ТПМ Черного моря в 1982–2002 гг. Пунктирные линии – тренд ТПМ в подпериоды 1982–1993 и 1993–2002 гг.

Хотя тенденции изменения сезонных и среднегодовых ТПМ, средних для всего моря и его отдельных регионов, в общем, одинаковы (определяются климатическими воздействиями), возможны их некоторые региональные различия, связанные с региональными различиями теплового баланса и особенностями локальной циркуляции вод [5]. Так, в [6] было показано, что потепление восточного глубоководного региона в 1982–2000 гг. происходило более быстрыми темпами, чем западного. Согласно настоящему исследованию, различия в темпах потепления в 1985–2002 гг. наблюдались также в существенно удаленных друг от друга юго-западном (прибосфорском, R1) и северо-восточном (R2) регионах. (Первый из этих регионов в значительной степени подвержен влиянию вод, распространяющихся с северо-западного шельфа на юг вдоль западного побережья моря, тогда как второй находится под влиянием теплых вод Основного черноморского течения и его ветвей, а также прибрежных и глубоководных вихрей [7].) Оцененное значение положительного тренда среднегодовых температур в 1985–2002 гг. для региона R2 оказалось вдвое большим, чем для R1: 0.12 и $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ соответственно. Для средней по морю температуры в этот период аналогичная оценка тренда дала $\sim 0.09^{\circ}\text{C}/\text{год}$. То есть потепление северо-восточного региона происходило более интенсивно, чем юго-западного и моря в целом.

Анализ изменчивости ТПМ по полученным (рис. 1–3) и опубликованным [2, 3] данным выявил годы с аномальными зимними (1954–2002 гг.), летними и среднегодовыми (1982–2002 гг.) значениями средней по морю ТПМ. Наиболее холодными были зимы 1954, 1964, 1976, 1985, 1987, 1992 и 1993 гг. (из них 4 пришлись на последние ~20 лет), с абсолютным минимумом в 1993 г.

Теплые зимы имели место в 1961, 1962, 1966, 1981, 1984, 1995, 1999 и 2001 гг., с абсолютными максимумами в 1966 и 2001 гг. Зиму 2002 г. (с довольно высокой ТПМ) на фоне потепления 1993–2002 гг. следует считать скорее холодной (рис. 1а).

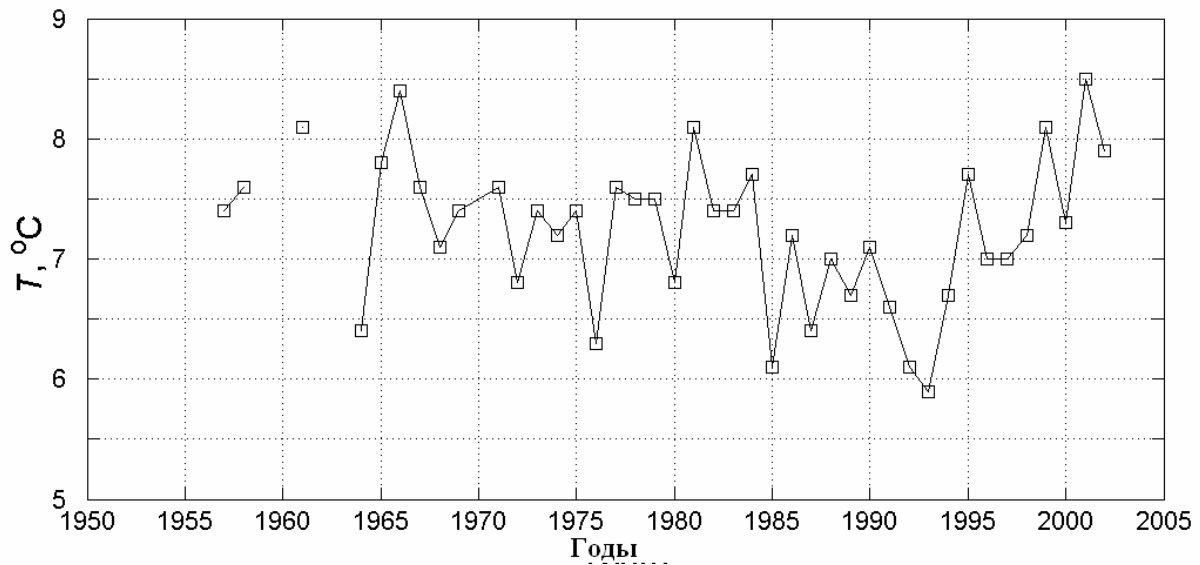


Рис. 3. Зимние значения ТПМ (средние за февраль–март) в 1957–2002 гг. При построении рис. 3 использованы результаты гидрологических измерений [2] в 1957–1983 гг. и обработанные спутниковые данные (1984–2002 гг.)

Наименьшие ТПМ в летние сезоны 1982–2002 гг. зарегистрированы в 1982 и 1985 гг. (низкими были также летние ТПМ в 1984, 1987, 1993 и 1997 гг., рис. 1в); аномально теплыми были летние сезоны в 1966, 1972 (в северо-западной части моря, см. [4]), 1999, 2001 и 2002 гг. Самые низкие среднегодовые ТПМ соответствовали годам с наиболее холодными зимами (1985, 1987 и 1993 гг.), самые высокие – годам с высокими летними и зимними температурами (1999, 2001 и 2002 гг.). Высокие среднегодовые ТПМ зарегистрированы также в 1966 г. (год с аномально высокими температурами в зимний и летний сезоны) и в 1975 г. (в северо-западной части моря [5]), низкие – в 1956 и в 1976 гг. (последний минимум – по крайней мере в северной части моря, зарегистрирован на гидрометеостанции в Одессе [5]).

Минимумы среднегодовых температур в регионах R1 и R2 в 1985–2002 гг. наблюдались в те же годы, что и в море в целом. В R1 наиболее четко выраженные минимумы ТПМ отмечены в 1985 и 1997 гг., в R2 – в 1987 и 1993 гг. Годами абсолютного максимума среднегодовых температур для R1, как и для моря в целом, были 1999 и 2001 гг. (15.9°C), для R2 – 2001 и 2002 гг. (16.3 и 16.7°C).

Отклик ТПМ на крупномасштабные атмосферные воздействия

Для выявления отклика температуры Черного моря на ЭНЮК и САК аномальные сезонные значения ТПМ (рис. 1–3) были сопоставлены по времени с фазами этих колебаний и характером их декадной изменчивости. Временные периоды событий Эль-Ниньо отмечены на рис. 1 и 2. О характере изменения индексов ЭНЮК и САК в 1950–2003 гг. можно судить по рис. 4 (отрицательные значения индекса ЭНЮК соответствуют событиям Эль-Ниньо).

В период 1954–2002 гг., для которого имеются данные по аномальным значениям зимних температур (рис. 3), имели место 12 событий Эль-Ниньо (рис. 4). Поскольку задержка по времени возможной реакции ТПМ Черного моря на фазы ЭНЮК (Эль-Ниньо или Ла-Нинья) неизвестна, условное отнесение той или иной температурной аномалии к ближайшему событию Эль-Ниньо/Ла-Нинья основано на предположении о заметном влиянии Эль-Ниньо на атмосферную

циркуляцию в атлантико-европейском регионе в течение 15 месяцев после максимального развития этого события (см. [8]). Годы с зимними аномалиями ТПМ обоих знаков отмечены на рис. 4 кружками.

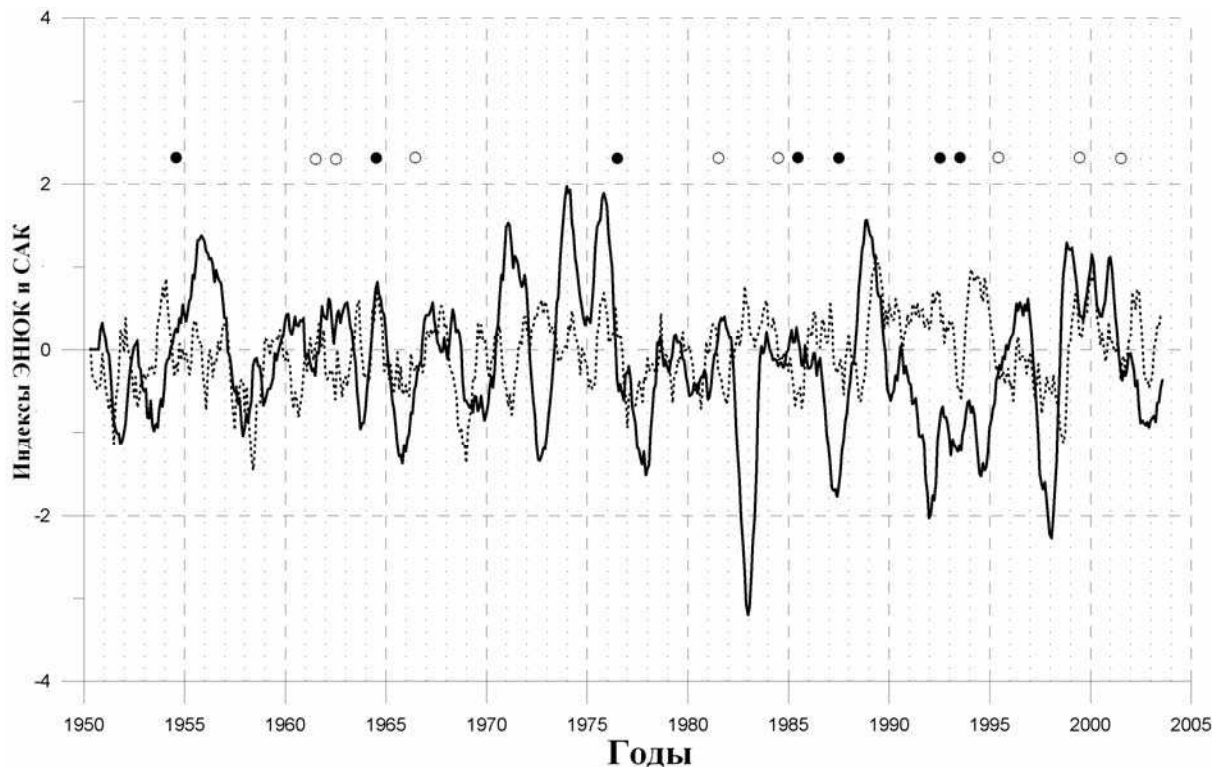


Рис. 4. Индексы ЭНЮК (сплошная линия) и САК (пунктир) в период с 1950 по 2003 г. (получены из среднемесячных значений соответствующих индексов, размещенных в Интернете на сайтах <http://www.cpc.NOAA.gov/data/indices/soi> и <http://www.cpc.NOAA.gov/data/teledoc>, методом скользящего среднего с осреднением в 6 мес). Отрицательным значениям индекса ЭНЮК соответствуют события Эль-Ниньо. Кружками отмечены годы с аномальными зимними значениями ТПМ: черные кружки – холодные зимы, белые – теплые

Можно видеть, что в 1954–2002 гг. большая часть четко выраженных зимних аномалий ТПМ имела место во время Эль-Ниньо или в годы, непосредственно следующие за этими событиями. Три аномалии (1962, 1976 и 2001 гг.) могли быть связаны с Ла-Нинья; аномалии 1961 и 1985 гг., в годы с малыми значениями индекса ЭНЮК, трудно отнести к определенной фазе этого атмосферного колебания. Из 10 зим, связанных с Эль-Ниньо, 5 были холодными (1954, 1964, 1987, 1992 и 1993 гг.) и 5 теплыми (1966, 1981, 1984, 1995 и 1999 гг.). Во время события Эль-Ниньо 1990–1995 гг. наблюдались как холодные зимы (в 1992 и 1993 гг.), так и теплая (в 1995 г.). Заметим, что величина зимней аномалии ТПМ не связана непосредственно с интенсивностью Эль-Ниньо. Так, одна из самых теплых зим 1966 г. совпала о времени с не очень интенсивным Эль-Ниньо 1965–1966 гг., тогда как самое интенсивное Эль-Ниньо 1982–1983 гг. сопровождалось меньшей аномалией того же знака (в 1984 г.).

Большая часть летних аномалий ТПМ (максимумов в 1966, 1972, 2001 и 2002 гг. и минимумов в 1982, 1984, 1993 и 1997 гг.) также соответствовала годам Эль-Ниньо. С Эль-Ниньо, возможно, было связано и теплое лето 1999 г. Все холодные аномалии ТПМ весной (рис. 1б) и большая их часть осенью (рис. 1г), а также большая часть максимумов температуры в эти переходные сезоны имели место в периоды событий Эль-Ниньо.

САК, оказывающее большое влияние на гидрометеорологические параметры в зимний период, – существенно более высокочастотное колебание по сравнению с ЭНЮК (рис. 4). (При по-

строении рис. 4 были использованы данные по индексам САК в Интернете за 2005 г.) Можно заметить, однако, что в 1950–1980 гг. в среднем преобладали отрицательные значения индекса САК, благоприятные для теплых зим, тогда как в период 1982–1994 гг. – положительные, при которых в регион Черного моря приходят холодные и сухие воздушные массы [9]. Именно в этот последний период наблюдались наиболее холодные зимы 1985, 1987, 1992 и 1993 гг. С другой стороны, при преимущественно положительных значениях индекса САК в конце 1990-ых–начале 2000-ых годов зимы в Черном море были теплыми.

Сопоставление аномальных зимних значений ТПМ в 1954–2002 гг. с соответствующими зимними индексами САК (средними за декабрь–март) показывает, что их однозначная связь отсутствует. Лишь в 7-ми случаях из 15-ти знак аномалии ТПМ соответствовал знаку индекса САК: теплые зимы 1962, 1966 и 2001 гг. при отрицательном индексе САК и холодные зимы 1954, 1976, 1992 и 1993 гг. при положительном. Следовательно, можно предположить, что, помимо САК, существуют также другие факторы, способствующие появлению зимних аномалий ТПМ. Одним из таких факторов может быть колебание ВАЗР [9]. При положительных (отрицательных) значениях зимних (декабрь–февраль) индекса ВАЗР черноморский регион подвержен воздействию холодных и сухих (теплых и влажных) воздушных масс с севера (юга).

Было проведено сопоставление выявленных в период 1954–2002 гг. зимних аномалий ТПМ с предложенными в [9] 4-мя комбинациями индексов САК и ВАЗР, определяющих преобладание теплых или холодных воздушных масс над черноморским бассейном. Выполненный анализ показал, что большая часть (14 из 15) аномальных зимних ТПМ укладывается в рамки этих комбинаций. Так, при $ВАЗР > 0$ и $САК < 0$ наблюдались аномально холодные зимы 1964, 1985 и 1987 гг. (рис. 3), а при $ВАЗР > 0$ и $САК > 0$ – зимние минимумы 1954, 1976, 1992 и 1993 гг. Т.е. положительным индексам ВАЗР, независимо от знака индекса САК, соответствуют холодные зимы [9]. Однако в эту закономерность не укладывается теплая зима 1995 г., наблюдавшаяся при $ВАЗР > 0$ и $САК > 0$.

При $ВАЗР < 0$ и $САК > 0$ возможны, в зависимости от относительной силы и пространственных размеров атмосферных систем – Исландского минимума и Каспийского максимума – как теплые, так и холодные зимы [9]. В нашем случае такой комбинации индексов соответствовали только аномально теплые зимы 1961, 1981, 1984 и 1999 гг. И, наконец, комбинация $ВАЗР < 0$ и $САК < 0$ должна приводить к теплым зимам, что соответствует наблюдениям (самые теплые зимы 1962, 1966 и 2001 гг., рис. 3).

Заключение

Анализ межгодовой изменчивости средней для Черного моря ТПМ, полученной с использованием спутниковых данных, выявил его потепление в 1982–2002 гг. с трендом температуры ~ $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Потепление Черного моря совпало с периодом глобального потепления, наблюдающегося с конца 1970-х годов [1]. Ему предшествовал, по-видимому, период маломеняющейся ТПМ в Черном море, что подтверждается характером изменения средних зимних температур в 1957–1980 гг. (рис. 3), отсутствием однонаправленных изменений ТПМ на 19-ти гидрологических станциях вдоль побережья моря в 1920–1985 гг. [5] и увеличением зимних (декабрь–март) температур за прошедшее столетие лишь на 0.25°C [9].

Крупномасштабные атмосферные колебания определенно влияют на температурный режим Черного моря, хотя однозначная связь между ними и характером аномалий ТПМ наблюдается не всегда. Большая часть зимних и летних аномалий ТПМ, зарегистрированных в 1954–2002 гг., совпала по времени с событиями Эль-Ниньо. Однако величины и знаки наблюдавшихся температурных аномалий не определялись интенсивностью этих событий (например, аномально теплая зима 1966 г. и аномально холодная зима 1993 г.). Возможно, что факторами, способствующими низким летним ТПМ в 1982 г. и низким среднегодовым (зимним и летним) ТПМ в 1993 г., явились извер-

жения вулканов Эль-Шишон (Мексика, апрель 1982 г.) и Пинатубо (Филиппины, июнь 1991 г.), имевшие место также в годы Эль-Ниньо.

Сопоставление знаков аномальных зимних ТПМ Черного моря и соответствующих зимних значений (средних за декабрь–март) индекса САК также не обнаружило однозначной связи между ними. Лучшее соответствие наблюдается между знаками зимних аномалий ТПМ и значений индекса колебания ВАЗР или известных комбинаций индексов ВАЗР и САК [9], определяющих преобладание теплых или холодных воздушных масс над черноморским бассейном. Однако в 1995 г., при комбинации индексов ВАЗР и САК, предполагающей преобладание над черноморским бассейном северных ветров, наблюдалась теплая зима. Следовательно, можно предположить, что в каждом отдельном случае разные комбинации различных глобальных (ЭНЮК, САК, ВАЗР, глобальное потепление или похолодание, извержения вулканов) и региональных факторов определяют значение и знак температурной аномалии Черного моря.

Межгодовая изменчивость ТПМ Черного моря существенно влияет на климатологию и экологию этого полузамкнутого бассейна [9, 10]. Поэтому мониторинг температуры Черного моря и его отдельных регионов, а также исследование реакции ТПМ на глобальные атмосферные воздействия необходимо продолжать. Регулярная спутниковая информация с высоким пространственно-временным разрешением может быть основой таких исследований в масштабе Черного моря и его регионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00141).

Литература

1. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Stephens C. Warming of the World Ocean // *Science*. 2000. V. 287. №5461. P.2225-2229.
2. Belokopytov V. Long-term variability of cold intermediate layer renewal conditions in the Black Sea. In: Ivanov L.I., Oguz T. (eds.) *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*. NATO Science Series. Series 2: Environmental Security 47. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1998. P.47-52.
3. Krivosheya V.G., Yakubenko V.G., Moskalenko L.V., Skirta A.Yu. Features of interannual variability of water dynamics and hydrological structure in the active layer in the northwestern part of the Black Sea from 1990 to 2004 // *Oceanology*. 2005. V. 45. Suppl. 1. P.S3-S12.
4. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability // In: Kostianoy A., Kosarev A. (eds.). *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. V. 5. Part Q. P.255-275. DOI 10.1007/698_5_067.
5. Симонов А.И., Альтман Е.Н. (ред.). Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.
6. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *J. Mar. Syst.* 2004. V. 52. №1-4. P.33-50.
7. Зацепин А.Г., Флинт М.В. (ред.). Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. 476 с.
8. Нестеров Е.С. Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья // *Метеорология и гидрология*. 2000. №8. С.74-83.
9. 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. V. 60. №3-4. P.235-254.
10. Yakushev E.V., Podymov O.I., Egorov A.V. et al. On the stability and interannual variability in the hydrochemical structure of the redox layer of the Black Sea // *Oceanology*. 2005. V. 45. Suppl. 1. P.S61-S75.