

Член-корреспондент НАН Украины А. Б. Полонский, И. Г. Шокурова

Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и начале XXI столетия

На підставі обробки кліматичного масиву гідрологічних даних аналізуються причини довгоперіодної мінливості температури у верхній частині основного пикнокліна Чорного моря і дається її ретроспективний прогноз для початку XXI століття на основі простої статистичної моделі. Показано, що в мінливості температури на глибині 100 м домінує періодичність у 50–60 років, яка є наслідком динамічного відклику морського середовища на квазіперіодичні зміни завихреності поля вітру в регіоні (що, певно, пов'язані з Атлантичною мультидекадною осциляцією). Крім того, в ході досліджень було виділено позитивний лінійний тренд температури (0,015–0,02 °C/10 років), значущий на рівні 80–90%, який, найімовірніше, є наслідком додаткової притоки мармуровоморських вод нижньобосфорською течією, що інтенсифікувалася. Зроблено висновок про те, що в найближчі 10 років температура пикнокліна у внутрішній частині циклонічного кругообігу Чорного моря залишиться високою.

Известно, что гидрологические и гидрохимические характеристики Черного моря подвержены низкочастотным изменениям с характерным периодом в несколько десятков лет [1–5]. Это приводит к различиям в оценках долговременных тенденций (трендов). Причем в большинстве случаев эти различия имеют принципиальный характер, поскольку выделенные тренды не совпадают даже по знаку. Особенно важно знать долговременные тенденции гидрологических и гидрохимических характеристик в основном пикноклине (на глубинах, превышающих 75–100 м). Действительно, наличие тренда температуры в промежуточных слоях Черного моря может характеризовать региональные тенденции, обусловленные глобальными изменениями климата. Отметим, что в верхнем приповерхностном слое положительный тренд температуры в Черном море не выделяется. Однако из этого еще не следует, что антропогенно обусловленные региональные изменения климата отсутствуют [2]. Выделение трендов в глубинных слоях моря затруднено из-за малого количества данных наблюдений и высокого уровня погрешностей разного типа [6]. В верхней части основного пикноклина выполнено намного больше измерений температуры, чем в глубинных слоях. Это позволяет понизить уровень шумов и более достоверно выделить тренды и/или низкочастотные квазипериодические колебания.

Авторами настоящего сообщения анализируются тренды и долгопериодная изменчивость температуры в основном пикноклине (горизонт 100 м) в центральной части Черного моря по архивным гидрологическим данным за последние 50 лет прошлого столетия. Затем дается ретроспективный прогноз температуры для начала XXI столетия на основе простой статистической модели. Прогноз выполнялся для периода с 2001 по 2005 гг., в течение которого гидрологические измерения проводились очень редко и лишь на незначительной части акватории моря. Результаты прогноза сравнивались с имеющимися для этого периода (немногочисленными) данными судовых измерений в восточной части моря.

Изменения температуры рассматривались на горизонте 100 м в центральных районах западной и восточной части моря, в области так называемых вековых разрезов, относительно

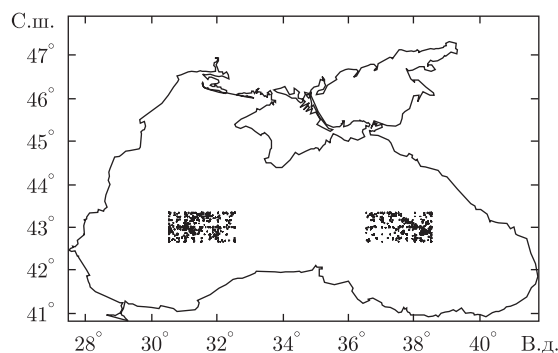


Рис. 1. Области Черного моря, для которых проводился анализ и прогноз температуры пикноклина.
На схеме — распределение станций внутри областей

хорошо обеспеченных наблюдений. Для этого использовались результаты гидрологических измерений в море из банка данных Морского гидрофизического института НАН Украины [7]. Данные осреднялись по двум областям (размером $120' \times 40'$) в западной и восточной части моря в отдельности (рис. 1). Выбранные сферические прямоугольники располагаются в окрестности куполообразного подъема изотерм, связанного с циклонической циркуляцией вод Черного моря, которая формирует два полузамкнутых круговорота [2–5]. Осреднение производилось за каждый год простым арифметическим суммированием и делением полученной величины на количество независимых измерений. Более сложные процедуры осреднения нецелесообразно использовать из-за небольших размеров сферических прямоугольников, по которым производилось осреднение, и малости горизонтальных градиентов температуры пикноклина внутри каждого из них [8].

Общее количество независимых судовых измерений температуры с 1950 по 2000 гг. составило 903 и 755 (соответственно для западного и восточного сферических прямоугольников). Однако результаты наблюдений очень неравномерно распределены во времени, особенно для западной области. Западный круговорот в Черном море наиболее полно обеспечен измерениями с середины 1970-х до середины 1990-х годов, когда каждый год выполнялось от нескольких десятков до ста и более наблюдений. Восточный круговорот более равномерно обеспечен наблюдениями приблизительно с конца 1950-х до середины 1980-х годов, когда осуществлялось несколько десятков измерений температуры ежегодно. В другие периоды выполненных измерений намного меньше, а в некоторые годы наблюдения вообще не производились (рис. 2).

Отметим, что после 2000 г. судовые наблюдения в области западного сферического прямоугольника практически прекратились, а в восточном — были выполнены измерения всего на двух гидрологических станциях в 2002 г. и на двадцати пяти станциях — в 2003 г. Вместе с тем с 2006 г. начала поступать информация о температуре воды, регистрируемая автономными глубоководными буями-профилемерами-ARGO. За период с 2006 г. по начало 2009 г. таких профилей в районе западного сферического прямоугольника было получено 44 [9].

Статистические характеристики рядов измерений в пикноклине с 1950 по 2000 гг. указывают на систематическое различие средних значений температуры между западной и восточной частью моря (табл. 1). Различие заключается в том, что на горизонте 100 м в восточной части моря (в среднем за 50 лет) на $0,1^\circ\text{C}$ температура ниже, чем в западной. Более высокие значения температуры на горизонте 100 м внутри западной части циклонического

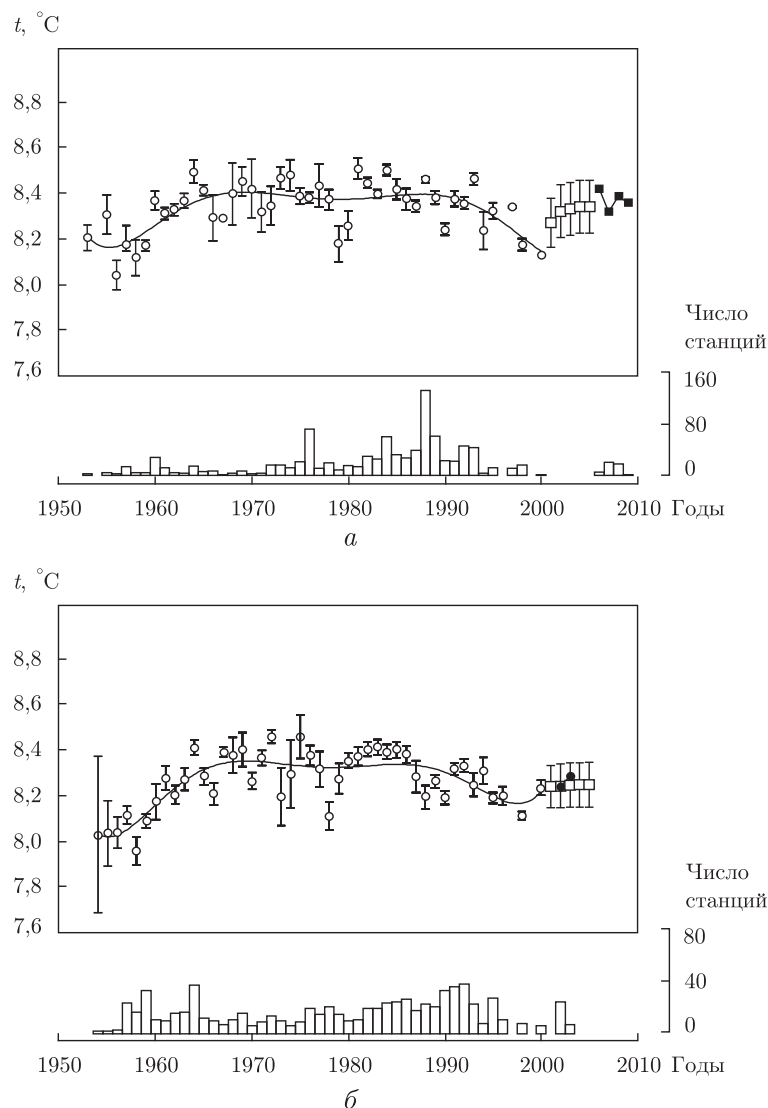


Рис. 2. Среднегодовые значения температуры на горизонте 100 м: *а* — для западной части Черного моря по данным судовых измерений (○), буев-ARGO (■) и прогноз температуры (□); *б* — для восточной части моря по данным судовых измерений (●) значения, используемые для апостериорной оценки качества прогноза. Вертикальные отрезки — 90% доверительные интервалы. Сплошная кривая — аппроксимация временного хода температуры полиномом 6-й степени. Диаграмма в нижней части рисунка — количество измерений, выполненных за каждый год

круговорота в Черном море объясняются близостью пролива Босфор и влиянием теплых мраморноморских вод, поступающих с нижнебосфорским течением.

Долгопериодная изменчивость для обоих районов характеризуется следующими особенностями. Повышение температуры наблюдалось с 1950-х до начала 1970-х годов. Затем началось медленное понижение температуры, которое интенсифицировалось с начала 1990-х годов. Наконец, с конца 1990-х годов температура снова начала повышаться (см. рис. 2), причем более чем на 55% (в западной части моря) и на 60% (в восточной его части) дисперсии рядов объясняются изменчивостью с периодами >10 лет. Рис. 2 ясно показывает, что в изменчивости температуры доминирует периодичность около 50–60 лет с амплиту-

дой порядка 0,1 °С. Кроме того, во временном ходе температуры отмечается изменчивость приблизительно вдвое меньшей периодичности и амплитуды.

На фоне ярко выраженного квазипериодического низкочастотного сигнала во временном ходе температуры выделяются линейные тренды с угловыми коэффициентами 0,015 °С/10 лет для западной области и 0,02 °С/10 лет для восточной. Статистическая значимость линейных трендов составляет более 80%. Однако они объясняют лишь незначительную часть изменчивости температуры. Основная же причина низкочастотных колебаний температуры в пикноклине — долгопериодные изменения завихренности в поле ветра над Черным морем.

Для определения изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра ($\text{rot}_z \tau$) использовались данные по скорости ветра из ре-анализа NCEP (Национальный центр прогнозов США) с пространственным разрешением $1,905^\circ \times 1,875^\circ$ за 1948–2007 гг. [10] и европейского ре-анализа ERA-40 (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) с пространственным разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ за 1958–2002 гг. [11]. Для расчетов касательного напряжения трения ветра применялась стандартная аэродинамическая формула $\tau = \rho_a C_d V^2$, где ρ_a — плотность воздуха; C_d — коэффициент сопротивления морской поверхности; V — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря. Расчет коэффициента C_d производился по эмпирическим формулам, заимствованным из работ [12, 13]. Величина $\text{rot}_z \tau$ вычислялась в узлах сетки, являющихся центрами квадратов, в вершинах которых расположены данные по ветру.

Данные ре-анализа NCEP показывают, что максимальное значение положительной завихренности в поле ветра возросло от $\sim 1,0 \cdot 10^{-7}$ Н/м³ (1950-е годы) почти до $2,5 \cdot 10^{-7}$ Н/м³ (1960–1970-е годы), т. е. более чем в два раза, затем — уменьшилось до $\sim 1,0 \cdot 10^{-7}$ Н/м³ (1990-е годы). В 1960-е и в начале 1970-х годов область высоких значений завихренности (более $1 \cdot 10^{-7}$ Н/м³) занимает всю восточную часть моря. В первое десятилетие настоящего столетия положительная завихренность снова увеличилась, причем ее максимум ($\sim 1,8 \cdot 10^{-7}$ Н/м³) наблюдается в северо-восточной части Черного моря (рис. 3). Близкие результаты получены по полю ветра европейского ре-анализа, хотя абсолютные величины завихренности, рассчитанные по этому полю, меньше из-за худшего пространственного разрешения. Коэффициент корреляции между двумя полями завихренности в зимний период превышает 0,9. Отметим, что завихренность поля ветра в зимний период предопределяет

Таблица 1

Статистическая характеристика	Западная часть моря (30°30'–32°30' в. д.; 42°40'–43°20' с. ш.)	Восточная часть моря (36°30'–38°30' в. д.; 42°40'–43°20' с. ш.)
Число лет с данными наблюдений	45	47
Общее число измерений	903	755
Среднее значение температуры, °С:	8,340	8,262
максимальное	8,855	8,700
минимальное	7,897	7,720
СКО* для ряда среднегодовых величин/СКО, рассчитанное по всему ряду измерений	0,103/0,141	0,118 /0,168
Характеристика линейного тренда	$T = 8,30 + 0,0015t$ (тренд значим на 80% уровне)	$T = 8,20 + 0,0022t$ (тренд значим на 90% уровне)

*Среднеквадратическое отклонение.

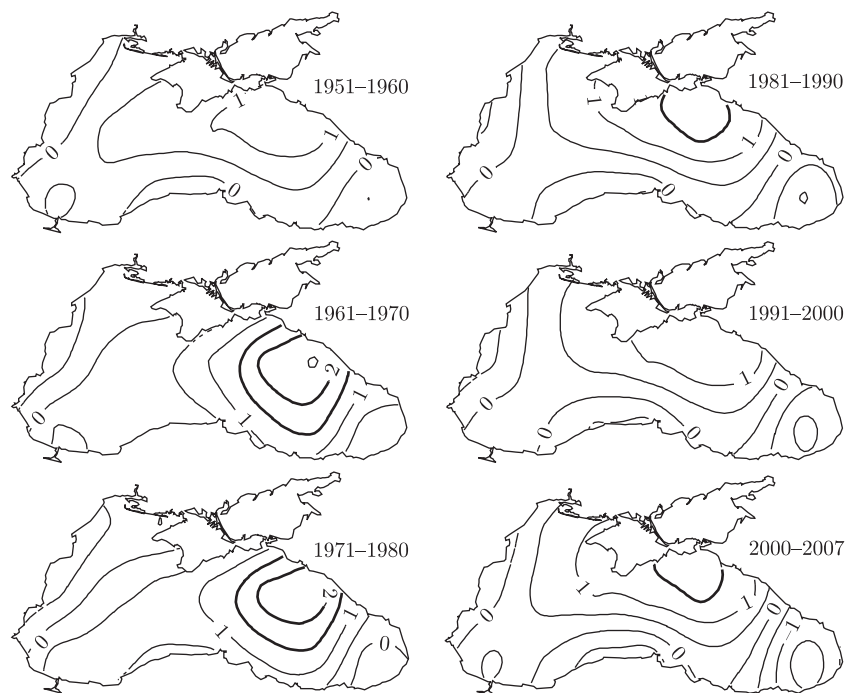


Рис. 3. Пространственное распределение средней завихренности поля ветра ($\text{rot}_z \tau \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^3$), рассчитанной по данным ре-анализа NCEP для января-февраля. Период осреднения (годы) для каждого поля — в правом верхнем углу. Подразумевается, что вертикальная ось направлена вверх

и среднегодовую циркуляцию вод пикноклина [14] (именно поэтому на рис. 3 приведено зимнее поле завихренности). Усиление завихренности в поле ветра в 1960-е годы, особенно выраженное в зимний период, явилось следствием увеличения количества циклонов, проходящих над Черным морем, которое обусловлено региональными проявлениями процессов крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой (прежде всего Атлантической мультидекадной осцилляцией [15]). Вследствие этого происходит более интенсивный подъем вод пикноклина в Черном море. Принимая во внимание величину вариаций вертикальной скорости в пикноклине (порядка 10^{-6} м/с), обусловленной этим механизмом, и типичный градиент температуры в промежуточном слое ($\sim 0,001 \text{ }^\circ\text{C/м}$), можно легко оценить характерные величины температурных изменений, вызванных низкочастотными вариациями завихренности в поле ветра. Для этого нужно постулировать следующий баланс тепла в пикноклине:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (1)$$

где T' и w' — флуктуации температуры и вертикальной скорости; $\partial \bar{T} / \partial z$ — градиент средней температуры в пикноклине.

Подставляя в выражение (1) приведенные выше характерные величины $\partial \bar{T} / \partial z$ и w' , получаем, что за 5 лет среднегодовая температура в пикноклине может колебаться в пределах $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$, что близко к наблюдаемым величинам (см. рис. 2). Поскольку низкочастотные вариации завихренности поля ветра максимально выражены в восточной части Черного

моря (см. рис. 3), соответствующая изменчивость температуры пикноклина характеризуется большей амплитудой именно в этой области.

Усиление завихренности в поле ветра должно сопровождаться не только подъемом изотерм и увеличением температуры пикноклина, но и интенсификацией геострофической циркуляции в основном пикноклине, вызванной обострением горизонтальных градиентов солёности и плотности. Действительно, по данным работы [3], геострофическая циркуляция во второй половине 1960-х годов усилилась.

Ретроспективный прогноз изменчивости температуры пикноклина на пятилетний период (с 2001 по 2005 гг.) выполнен на основе использования авторегрессионной модели первого порядка (AR-1). Предполагалось, что

$$T^{j+1} = a + bT^j + \gamma, \quad (2)$$

где T — среднегодовое значение температуры; j — годы; a — константа; b — коэффициент авторегрессии; γ — белый шум. Подбор коэффициентов осуществлялся путем стандартной процедуры минимизации остаточной дисперсии. Полученные прогностические формулы можно записать так:

для западной части моря

$$T^{j+1} = 8,31 + 0,000965T^j + \gamma, \quad (3)$$

для восточной —

$$T^{j+1} = 8,22 + 0,001T^j + \gamma. \quad (4)$$

Рассчитанные величины температуры с 2001 по 2005 гг. приведены на рис. 2 вместе с 90%-м доверительным интервалом. Как для западной, так и для восточной части моря на горизонте 100 м в области пикноклина прогнозировалась тенденция к повышению температуры (до $\sim 0,1$ °C за 5 лет, что на порядок превышает величину оцененного выше линейного тренда).

В 2001–2005 гг. в восточном сферическом прямоугольнике были выполнены независимые измерения температуры пикноклина, следовательно, можно проверить качество прогноза по контрольной выборке. Сравнение прогностических величин температуры с осредненными результатами измерений, выполненными в прогнозируемый период, показало хорошее качество прогноза (см. рис. 2, б). Средние значения температуры по этим данным находятся внутри области доверительных интервалов прогноза.

Учитывая характерный период Атлантической мультидекадной осцилляции (около 60 лет), следует ожидать, что в ближайшие 10 лет эта температура во внутренней части циклонического круговорота Черного моря останется высокой, так же как и интенсивность циркуляции в подповерхностном слое. Этот вывод косвенно подтверждается относительно высокими значениями температуры верхней части пикноклина, регистрируемыми автономными буями-профилемерами в последние годы в западном сферическом прямоугольнике (см. рис. 2, а). Таким образом, повышение температуры, наблюдаемое в настоящее время, в первую очередь является следствием динамического отклика морской среды на квазипериодические изменения завихренности поля ветра в регионе (связанные, главным образом, с Атлантической мультидекадной осцилляцией). Сигнал, связанный с возможными региональными проявлениями глобального изменения климата антропогенного происхождения,

является менее значимым. Он отвечает лишь за малую долю изменчивости температуры на временных масштабах в несколько десятков лет. Причем, повышение температуры промежуточного слоя вод не связано непосредственно с их нагреванием в черноморском регионе вследствие потепления нижней части тропосферы (поскольку положительный тренд температуры в приповерхностном слое не выделяется [2]). Скорее всего, оно является следствием дополнительного притока средиземноморских вод интенсифицировавшимся нижнебосфорским течением. Это приводит не только к увеличению температуры и солености промежуточных вод, но и усиливает термохалинную циркуляцию Черного моря [3]. Такое усиление нижнебосфорского течения по всей вероятности является результатом региональных изменений климата, проявляющихся в изменении пресного и теплового баланса Средиземного и Черного морей.

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 4. – Черное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. И. Альтмана. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – 430 с.
2. *Полонский А. Б., Воскресенская Е. Н.* О причине понижения температуры в Черном море // *Доп. НАН України*. – 2003. – № 12. – С. 108–111.
3. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Десятилетняя изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 4. – С. 75–92.
4. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* О сезонном ходе геострофической циркуляции в Черном море // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2010. – № 1. – С. 51–65.
5. *State of the Environment of the Black Sea (2001. – 2006/7)* / Ed. by T. Oguz. – Istanbul, Turkey: Publ. Commis. of the Protect. of the Black Sea Against Pollution (BSC), 2008. – 448 p.
6. *Полонский А. Б., Ловенкова Е. А.* Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. – 2006. – 42, № 3. – С. 419–430.
7. *Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет* / Под общ. ред. В. Н. Еремеева. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2004. – 704 с.
8. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2008. – № 1. – С. 51–65.
9. <http://www.usgoda.gov/argo/argo.html>.
10. <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>.
11. <http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html>.
12. *Hellerman S., Roserstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13. – P. 1093–1104.
13. *Large W. G., Pond S.* Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *Ibid.* – 1981. – 11. – P. 324–336.
14. *Полонский А. Б., Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2007. – № 6. – С. 47–58.
15. *Полонский А. Б.* Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан – атмосфера, термохалинная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-европейского региона. Сер. Современные проблемы океанологии. Вып. 5. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2008. – 45 с.

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

Long-term variability of the Black-Sea pycnocline temperature in the XX-th and XXI-st centuries

Causes for the long-term variability of a temperature of the upper Black-Sea pycnocline are analyzed using historical hydrographic data sets, and the retrospective forecast for the beginning of the XXI-st century is performed on the basis of a simple statistical model. It is shown that the periodicity of 50–60 years dominates in the temperature variability at the 100-m depth. It is a consequence of the dynamic response of the marine environment to quasiperiodic changes of the regional wind field vorticity (likely, due to the Atlantic multidecadal oscillation). In addition, the positive linear trend of temperature (0.015–0.02 °C/10 years, significant at the 80% confidence level) occurs. It is probably a result of the additional inflow of Marmara sea waters by the intensified low-Bosporus current. It is concluded that, during the following 10 years, the pycnocline temperature within the cyclonic Black sea gyre will be high.