

МОНИТОРИНГ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЕЙ

УДК 551.524, 526

Л.Н.Репетин

*Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института, г.Севастополь*

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

Приведены результаты анализа многолетних измерений температуры воды (до 109 лет) и воздуха (до 128 лет) у берегов северо-западной части Черного моря, Крыма и Кавказа. Исследованы климатические изменения температурного режима на межгодовом, сезонном и месячном масштабах. Показано, что на севере Черного моря основной причиной общего повышения температуры воды являются положительные тренды температуры воздуха. Факторами, снижающими интенсивность потепления или понижающими температуру воды, являются ветровые сгоны, прибрежные апвеллинги и атмосферные осадки. В юго-восточной части побережья Черного моря общая тенденция увеличения атмосферных осадков является основной причиной отрицательных трендов температуры воды, несмотря на интенсивное потепление в конце XX – начале XXI вв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *прибрежная зона, температура воды и воздуха, сезонная и межгодовая изменчивость, тренды, глобальное потепление, осадки.*

Введение. Температурный режим в прибрежной зоне Черного моря определяется климатическими условиями, радиационным балансом на суше и морской поверхности, конвективным теплообменом поверхностных слоев воды с атмосферой и глубинными слоями, адвекцией вод морскими течениями, процессами турбулентного перемешивания и сгонно-нагонной циркуляцией у берегов. В годовом ходе баланса тепла в поверхностном слое Черного моря доминируют процессы вертикального перераспределения тепла и теплообмен через поверхность моря.

Информация о температуре воздуха и воды в прибрежной зоне Черного моря за прошлые годы помещена в ряде справочников, ежегодников и атласов в виде ежедекадных, месячных и годовых значений. Эта информация обобщена в монографии [1], где наиболее полно исследована термохалинная структура вод, представлены статистические оценки температуры воды у берега, выполнен подробный анализ корреляционных функций, оценок спектральной плотности и межгодовой изменчивости рядов температуры за период до 1985 г. Учитывая, что последние 25 лет проходили в условиях глобального потепления климата, актуальность проблемы исследования изменений температурного режима морских регионов значительно возросла. Оценки климатических, межгодовых и сезонных изменений температуры воздуха вдоль рассматриваемых побережий приведены в работе [2]. Ряд со-

© Л.Н.Репетин, 2012

временных публикаций посвящен анализу трендов температуры воды Черного моря, исследованию причин её долгопериодных изменений, а также оценке влияния глобальных климатических сигналов на изменения климата Европейского континента и бассейна Черного моря [3 – 6]. Результаты дистанционных спутниковых измерений температуры поверхности Черного моря (ТПМ) представлены в работе [7]. Региональные особенности температурного режима прибрежной зоны Крыма исследованы в работах [8 – 11].

В данной работе приведены статистические характеристики и оценки климатических изменений температуры воды и воздуха на обширном пространстве вдоль украинского и кавказского побережий Черного моря. При этом использовались многолетние массивы натуральных наблюдений, включающие последние годы. Анализ этих массивов интересен потому, что это единственный источник регулярной информации о температуре воды в Черном море, который может быть использован как для оценки изменений

Т а б л и ц а . 1 . Береговые станции, периоды и продолжительность измерений температуры воды.

станции	период (гг.)	кол-во лет
Усть-Дунайск	1983 – 2008	25
Приморское	1951 – 2008	57
Цареградское гирло	1958 – 2008	50
Ильичевск	1962 – 2008	46
Одесса	1914 – 2008	94
Южный	1981 – 2008	27
Очаков	1926 – 2008	82
Хорлы	1924 – 2008	84
Черноморское	1927 – 2008	81
Евпатория	1914 – 2008	94
Севастополь	1912 – 2008	96
Херсонесский маяк	1923 – 2008	85
Ялта	1900 – 2009	109
Алушта	1948 – 2008	60
Феодосия	1923 – 2008	85
Заветное	1950 – 2008	58
Анапа	1923 – 2006	83
Новороссийск	1924 – 2007	83
Туапсе	1924 – 2006	82
Пицунда	1951 – 1994	43
Сухуми	1924 – 1991	67
Поти	1923 – 1991	68
Батуми	1925 – 1995	70

температурного режима, так и в целях валидации спутниковых измерений температуры поверхности моря и результатов диагностических модельных расчетов, в том числе данных ре-анализа. До последнего времени измерения температуры воды у берега использовались при расчетах парциального давления водяного пара, как одного из основных параметров при оценке испарения с поверхности Черного моря. Поэтому в работе рассмотрены также локальные температурные особенности береговых регионов в сравнении со средней температурой поверхности Черного моря.

Материалы и методы обработки. В качестве информационной основы использованы данные регулярных натуральных гидрометеорологических наблюдений в прибрежной зоне Черного моря, которые проводились на морской сети станций Гидрометслужбы СССР, (в настоящее время – Украины, России и Грузии) в период с 1900 по 2008 гг.

Это данные 23 береговых станций от устья Дуная до юга Кавказа (продолжительностью наблюдений от 25 до 109 лет), представляющие все характерные в климатическом и ландшафтном отношении районы побережья Черного моря (табл.1). В ряде таблиц и рисунков совмещены данные этих станций, имеющих разные периоды наблюдений. Сделано это с целью представления, по возможности, полной информации, накопленной морскими станциями за весь период наблюдений. При климатических оценках это учитывалось, расчеты и сравнения трендов проводились только по синхронным рядам наблюдений. Для этого были выбраны 15 станций с рядами измерений температуры воды продолжительностью 67 и более лет, которые выделены в табл.1 жирным шрифтом. Недостатком используемого массива измерений является отсутствие информации за последние 25 лет по четырем станциям Грузии, а также данных срочных наблюдений на этих станциях.

Ряд среднемесячных значений ТПМ глубоководной (за 100-метровой изобатой) части Черного моря за период с 1985 по 2006 гг. рассчитан С.В.Станичным по картам дистанционных спутниковых измерений температуры воды на поверхности (<http://dvs.net.ua>), регулярно принимающимся в Морском гидрофизическом институте (МГИ) НАН Украины [7].

Оценка межгодовых изменений осуществлялась в рамках общей методологии статистического анализа временных рядов [12]. Для анализа линейных трендов рядов измерений температуры воды у берега и оценки их статистической значимости использовался набор статистических параметров, расчетом которых обычно сопровождается оценка коэффициентов уравнения линейной регрессии, описывающих наклон линии тренда. С целью унификации статистического анализа и сравнимости трендов, при расчетах в основном использовались ряды продолжительностью от 67 – 83 лет (кавказское побережье) до 81 – 85 лет (побережье Украины). Аналогичные расчеты производились отдельно и для полных рядов продолжительностью 94 – 109 лет. При расчете трендов использовались ряды среднегодовых и среднемесячных значений без предварительного сглаживания. Каждый расчет сопровождался тестом на сериальную коррелированность ряда с помощью критерия Дурбина-Ватсона [13].

Пространственное распределение в прибрежной зоне. Особенности температурного режима прибрежных вод зависят от географического положения отдельных районов, ориентации и морфологии берегов, батиметрии шельфовой зоны, а также условий водообмена, на которые оказывают влияние не только глубины, но и локальные особенности ветрового режима, наличие или отсутствие речного стока, степень влияния Основного Черноморского течения (ОЧТ).

На температуру воды северо-западной части (СЗЧ) Черного моря влияет её расположение (самое северное по отношению к другим районам моря), мелководность прибрежной зоны, сток рек Днестра, Днепра и Дуная, сгонно-нагонные явления и водообмен с глубоководными районами моря. Этот регион характеризуется самыми низкими температурами воды во все сезоны года.

Прибрежная зона Южного берега Крыма (ЮБК) занимает самое южное положение на морском побережье Украины, имеет приглубые берега, испытывает влияние меандрирующего потока ОЧТ и вихревых динамических

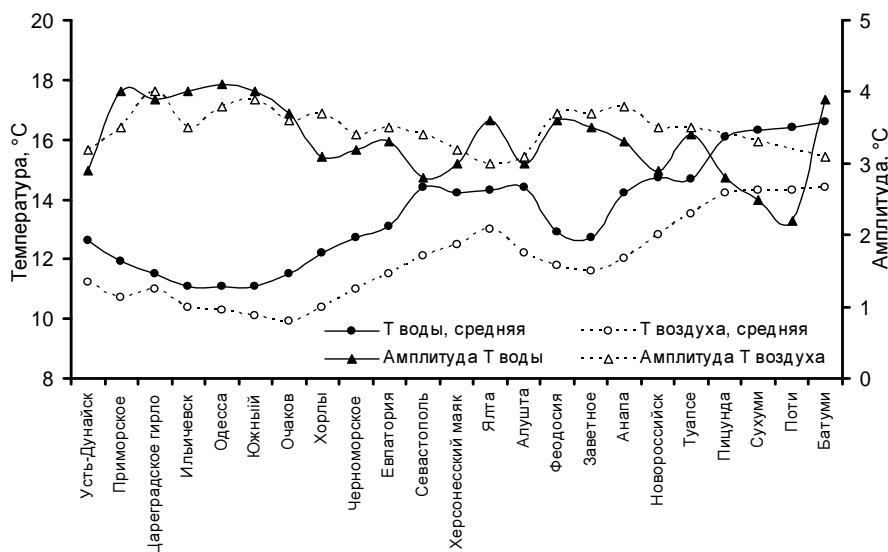
образований, связанных с его неустойчивостью. Это регион наиболее высокой температуры украинских территориальных вод. Штормовые ветры способствуют выходу на поверхность холодных глубинных вод (при сгонах, апвеллингах) или повышению температуры воды у берега и увеличению слоя теплых вод (при нагонах).

На температуру воды северо-восточной части (СВЧ) моря также сильное влияние оказывает северная периферия ОЧТ, которое обеспечивает адвекцию теплых вод кавказского региона и способствует переносу к берегам Крыма распресненных вод Азовского моря (летом более теплых, зимой более холодных), поступающих из Керченского пролива. Сильные ветры юго-западных, северных, северо-восточных направлений способствуют увеличению контрастов температуры воды из-за сгонно-нагонных процессов.

Воды у юго-восточного побережья Кавказа самые теплые [7], что объясняется, во-первых, южным географическим положением региона, где наибольшая инсоляция и, во-вторых, преобладанием западного переноса над акваторией Черного моря. Ветры западной половины горизонта сгоняют теплые поверхностные воды в восточную и юго-восточную части моря, откуда они переносятся ОЧТ на северо-восток моря и к побережью Крыма.

Средние годовые значения температуры воды, рассчитанные за многолетний период, изменяются вдоль побережья от 11,1 °С на севере СЗЧ до 14,4 °С на ЮБК и 14,7 – 16,6 °С у кавказского побережья (рис.1). В северных частях прибрежной зоны амплитуды (разница максимальных и минимальных годовых величин) температуры воды наибольшие (3,5 – 4,1 °С).

Подобные величины амплитуд отмечены и в самых южных районах – Ялта, Батуми. В районах устья Дуная, юго-западного Крыма и северного Кавказа (Новороссийск), характеризующихся повышенной ветровой активностью и интенсивным перемешиванием, величины годовых амплитуд наименьшие (2,8 – 3,0 °С). Низкие значения амплитуд температуры воды в рай-

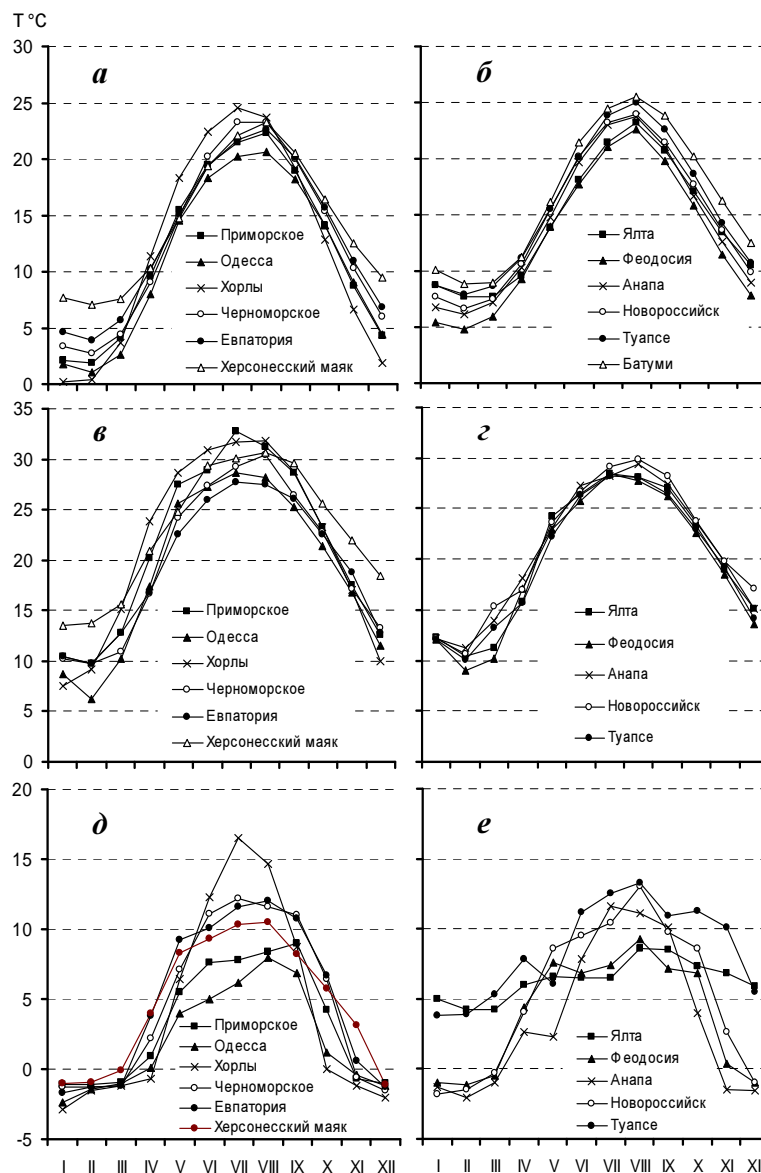


Р и с . 1 . Средние многолетние температуры (Т) воды и воздуха, их амплитуды, вычисленные за период наблюдений с 1923 по 2008 гг.

оне от Пицунды до Поти, скорее всего, объясняются отсутствием данных периода потепления 1992 – 2008 гг. Увеличение годовых амплитуд в северных районах, вероятно, связано с общими колебаниями климата, влиянием стока рек и водообмена через Керченский пролив; максимум амплитуды в районе Ялты может быть следствием интенсивных прибрежных апвеллингов. На рис.1 представлены также среднемноголетние величины температуры воздуха и их амплитуды в тех же пунктах побережья, вычисленные за периоды, синхронные периодам использованных данных температуры воды. В целом, тенденции изменений среднемноголетних величин температуры воды и воздуха аналогичны, что свидетельствует о преобладании вклада климатических и радиационных факторов в формировании температурного режима прибрежной зоны. Тем не менее, разность температурных "норм" воды и воздуха в южных регионах (побережье Крыма – 1,9 °С, Кавказ – 1,8 С) почти вдвое больше, чем на северных участках северо-западной и северо-восточной частей моря (1,0 – 1,1 °С). В качестве различий следует также отметить относительное понижение температуры воды и увеличение амплитуды в районе юга Крыма (Херсонесский маяк, Ялта) на фоне локального максимума температуры воздуха и уменьшения её амплитуды, что также может быть связано с высокой повторяемостью летних понижений температуры воды из-за прибрежных апвеллингов и сгонов.

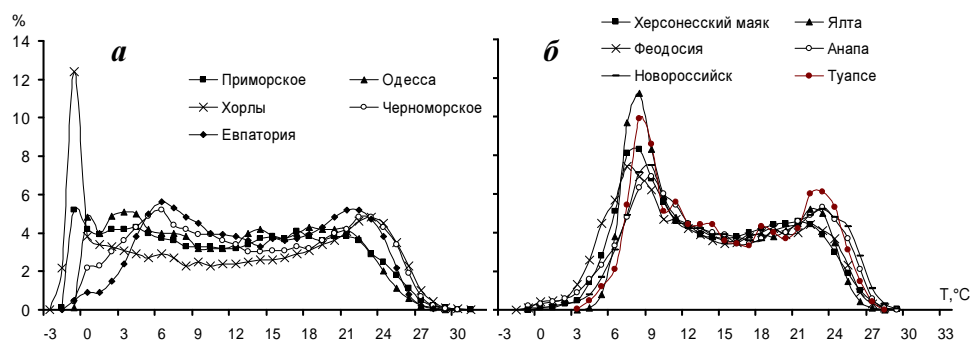
Сезонная изменчивость температуры воды. Внутригодовые изменения температуры воды в прибрежной зоне Черного моря имеют хорошо выраженный сезонный характер. На рис.2 представлены сезонные изменения многолетних среднемесячных (рис.2, *а, б*) и экстремальных (рис.2, *в – е*) значений температуры воды характерных регионов прибрежной зоны северо-западной, северо-восточной и восточной частей моря. На всем протяжении прибрежной зоны самые низкие температуры воды наступают в январе – феврале и согласуются с минимумом температуры воздуха. Минимальные среднемесячные температуры зимой отмечены у северного побережья Каркинитского залива (Хорлы 0,4 – - 1,1 °С), в Одесском заливе (1,1 – - 0,9 °С) и в районе устья Дуная (2,2 – - 0,3 °С). Самые низкие температуры наблюдались в периоды суровых зим 40 – 50-х гг. прошлого столетия. Значительно выше зимние температуры в районах, расположенных южнее: в Каламитском заливе (Евпатория) и на юго-западе Крыма. В районе м.Херсонес даже в самые холодные зимы среднемесячные температуры воды не опускались ниже 4,0 °С (несмотря на мелководность места измерений на станции Херсонесский маяк), что свидетельствует о хороших условиях водообмена у этого далеко выдающегося в море мыса. В самые суровые зимы вдоль всего северного побережья экстремально низкие температуры воды опускалась ниже 0 °С (рис.2, *д, е*). Только у ЮБК (Ялта) и кавказского побережья южнее Туапсе абсолютные минимумы температуры не опускались ниже 4 – 5 °С (рис.2, *е*).

В периоды теплых зим даже у северных участков побережья в декабре – феврале среднемесячные температуры составляли 4,0 – 5,6 °С, а в южных районах 7,6 – 10,0 °С. Абсолютные максимальные величины температуры воды в такие периоды в северной части достигали 6,0 – 11,0 °С, а на юге 14,0 – 18,0 °С (рис.2, *в*). Суммарная повторяемость температуры воды, рассчитанная по данным срочных наблюдений полных рядов (табл.1), показыва-



Р и с . 2 . Годовой ход среднемесячных значений (а, б), абсолютных максимумов (в, г) и минимумов (д, е) температуры воды у берегов северо-западной и восточной частей моря.

ет наличие двумодального распределения с максимумами в холодный и теплый периоды (рис.3). Для западных и северных регионов прибрежной зоны наиболее часто повторяющиеся зимние температуры воды (25 – 30 % всех случаев) это -1 – 5 °С, для зоны западного Крыма 4 – 10 °С, а на юге, востоке Крыма и кавказском побережье 6 – 12 °С. В конце марта – начале апреля температура воды быстро повышается и достигает максимума в июле – августе, когда среднемесячные температуры достигают 20 – 25 °С. При этом наибольшую повторяемость (23 – 32 %) имеют случаи с температурой 19 –



Р и с . 3 . Суммарная повторяемость (%) температуры воды по данным срочных измерений на береговых станциях северо-западного (а), крымского и восточного побережий Черного моря (б).

26 °С на севере региона и 22 – 28 °С на юге. Среднемесячные максимумы отличаются мало (25 – 27 °С), а абсолютные максимумы достигают 30 – 32 °С в зоне устья Дуная (Приморское), в мелководной вершинной части Каркинитского залива (Хорлы) и у отмелого берега м.Херсонес (рис.2, в). У приглубых восточных берегов, с хорошим водообменом, температура воды летом никогда не достигала 30 °С (рис.2, з). Наиболее часто повторяющиеся здесь летние температуры воды 21 – 25 °С (30 – 35 %), при этом самая высокая повторяемость случаев с максимальной температурой отмечены у кавказских берегов (Анапа, Новороссийск). Это объясняется адвекцией теплых вод из южных районов кавказского региона, транспортируемых потоком ОЧТ, и нагонами теплых поверхностных вод.

Практически в каждый летний сезон в любой части северного побережья возможны резкие понижения температуры воды, которые вызваны западными и северо-западными ветрами, сопровождающимися сгонами поверхностных вод и развитием прибрежного апвеллинга с выходом на поверхность более холодных вод из нижележащих горизонтов [8 – 11]. В летний период с явлением прибрежного апвеллинга в большей мере, чем с общими похолоданиями, связаны понижения среднемесячной температуры у кавказского побережья до 17,5 – 21,0 °С, в СЗЧ до 14 – 19 °С, а у ЮБК даже до 12,5 – 15,9 °С. Абсолютные минимальные значения температуры в периоды летних сгонов и апвеллингов могут понижаться на севере СЗЧ до 5 – 8 и до 9 – 13 °С в её южной части (рис.2, д). У ЮБК и в Феодосийском заливе до 6,3 – 8,4 °С, а у кавказского побережья до 9,5 – 13,3 °С (рис.2, е). Подобные интенсивные (в течение нескольких часов) понижения температуры поверхностных вод с 20 – 25 до 6 – 13 °С начинаются в июне, в период формирования термоклина, и могут появляться в течение всего теплого сезона до октября. Сгонно-нагонные явления проявляются и в зимний период, когда перепады температуры воды за несколько суток или часов могут достигать 5 – 10 °С.

Поскольку измерения температуры воды у берега использовались при расчетах испарения с поверхности Черного моря, целесообразно оценить температурные особенности береговых регионов в сравнении со средней температурой поверхности Черного моря. На рис.4 совмещены графики средних значений разницы месячных величин ТПМ и температуры воды у

берега разных регионов побережья Черного моря, вычисленных за 1985 – 2006 гг. Наибольшие расхождения отмечены в северо-западной части (Одесса, Хорлы, Черноморское) и Феодосийском заливе (Феодосия), где температура воды в летние периоды существенно ниже, чем в центральных районах моря из-за высокой повторяемости ветровых сгонов и апвеллингов (рис.4, а, б). Зимой, из-за охлаждения вод мелководного шельфа в морозные периоды, температура воды у берегов здесь также существенно ниже средней ТПМ (на 4 – 7, а в отдельные годы на 8 – 11 °С). На юго-востоке кавказского побережья (Батуми), в области с самым высоким фоном температуры воды, в течение всего года разница температур с отрицательным знаком (- 1,5 – - 2,5 °С). Наименьшими разницы оказались в районах с приглубыми берегами на участках узкого шельфа южного Крыма (Ялта) и северного Кавказа (Анапа, Новороссийск, Туапсе). Здесь разница ТПМ и температуры у берега в среднем составляла 0,2 – 0,5 °С, поэтому полный ряд Ялты является наиболее репрезентативным. По этой же причине при расчетах испарения с поверхности центральной части Черного моря целесообразно использовать данные станций Ялта, Севастополь, Анапа, Новороссийск, Туапсе и не привлекать информацию станций Одесса и Хорлы.

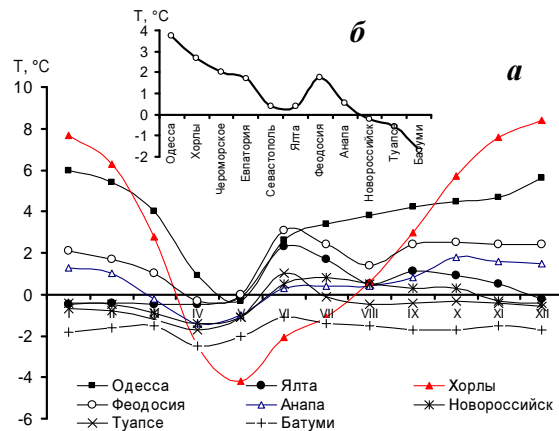
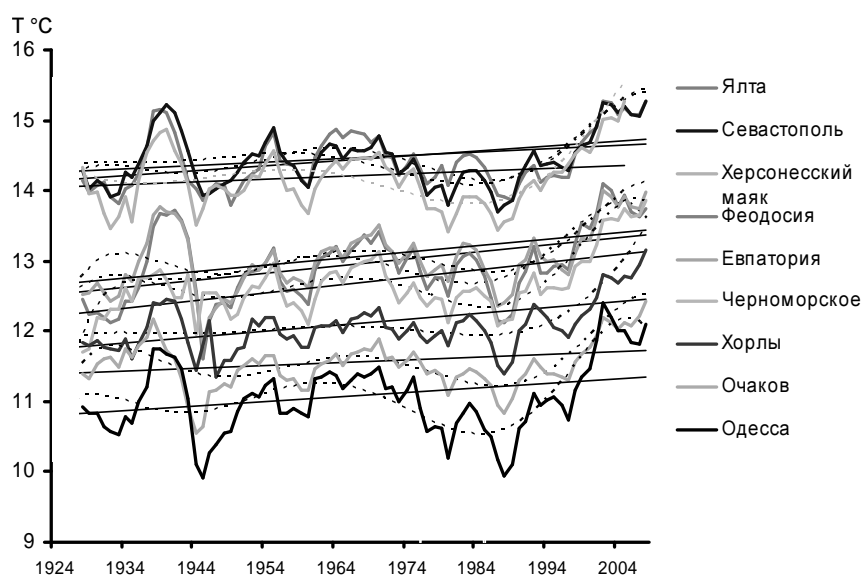


Рис.4. Разница средней месячной ТПМ (спутниковые измерения) и температуры воды у берега по наблюдениям на станциях (а). Средние годовые разницы от Одессы до Батуми (б). 1985 – 2006 гг.

Межгодовая изменчивость. При исследовании климатических изменений использовались наиболее продолжительные ряды среднегодовых и среднемесячных величин температуры воды на 9 береговых станциях Украины (Одесса, Очаков, Хорлы, Черноморское, Евпатория, Севастополь, Херсонесский маяк, Ялта и Феодосия), на 3-х станциях России (Анапа, Новороссийск, Туапсе) и на 3 станциях Грузии (Сухуми, Поты, Батуми). По трем последним станциям мы располагаем рядами среднемесячной температуры воды только до 1991 – 1995 гг. Особое внимание уделялось сравнению угловых коэффициентов линейных трендов и оценке статистической значимости несглаженных рядов. Использованные ряды температуры воды, в основном, сериально не коррелированы, т.к. критерий Дурбина-Ватсона в подавляющем большинстве рядов $> 1,5$ [13].

В результате расчетов оказалось, что тренды всех рядов северного (украинского) побережья положительны (рис.5), т.е. отмечается повсеместный рост температуры воды, однако значимость трендов (P_0) выше 90 % уровня только у рядов станций Хорлы, Черноморское и Феодосия (табл.2). Повышение температуры воды у берегов СЗЧ осуществлялось, в основном, за счет зимних сезонов. За последние 83 года температура гидрологических зим



Р и с . 5 . Межгодовые изменения температуры воды у северного побережья Черного моря (скользящее 5-ти летнее осреднение). Прямые сплошные линии – линейные тренды, пунктирные – полином 5 степени. 1924 – 2008 гг.

(среднее за январь, февраль и март) повысились на 0,9 – 1,6 °С. Тренды летних периодов (среднее за июнь, июль, август) оказались незначимыми, однако отрицательные тренды на севере (Одесса, Очаков) свидетельствуют о вероятности понижения температуры воды на 0,2 – 0,4 °С (табл.2).

У самого длинного 109-летнего ряда Ялты (1900 – 2009 гг.), положительный тренд (0,088 °С/10 лет) оказался значимым на уровне 99 %. За период наблюдений общий рост температуры воды у берега Ялты составил 0,96 °С. Такой тренд обусловлен не только потеплением в конце периода, но и относительно низкими температурами в начале XX в. (рис.6). Аппроксимация этого непрерывного наиболее надежного ряда Ялты полиномом 5 степени показывает, что период межгодовых колебаний температуры воды сопоставим с длиной ряда, близок к долгопериодным колебаниям температуры воздуха [2] и составляет ~ 70 – 80 лет, а не 40 – 50 лет, как следует из рис.5, построенного по более коротким рядам измерений температуры воды. Тем не менее, на рис.5 и 6 одинаково заметен период потепления 1930 – 1950 гг., после которого в 70 – 80-е гг. наступало очевидное похолодание прибрежных вод, сменившееся в конце XX ст. интенсивным общим повышением температуры воздуха и воды в результате общепризнанного глобального потепления.

Синхронность колебаний температуры воды (рис.5) позволяет предполагать, что особенности долгопериодных колебаний температуры воды в других регионах северного побережья Черного моря аналогичны выявленным по полному ряду Ялты и подобны долгопериодным колебаниям температуры воздуха.

Как показано в [2], межгодовые колебания приземной температуры воздуха происходят в противофазе с изменениями годовых значений индекса Северо-Атлантического колебания (САК) на аналогичных масштабах (70 – 80 лет).

Т а б л и ц а 2. Характеристики линейных трендов ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) годовых (T_g) и сезонных (зима – T_z , лето – T_l) величин температуры воды на береговых станциях СЗЧ, Крыма и Кавказа. Выделены тренды значимостью $> 90\%$ уровня.

станция	период, гг.	$T_g, ^{\circ}\text{C}/10$ лет	P_0	$\Delta_z, ^{\circ}\text{C}$	$T_z, ^{\circ}\text{C}/10$ лет	$\Delta_l, ^{\circ}\text{C}$	$T_l, ^{\circ}\text{C}/10$ лет	$\Delta_l, ^{\circ}\text{C}$
Одесса	1923 – 2006	0,03	0,464	0,25	0,19	1,56	-0,05	-0,41
Очаков	1926 – 2006	0,02	0,590	0,16	0,11	0,87	-0,02	-0,16
Хорлы	1923 – 2006	0,06	0,058	0,50	0,17	0,90	0,01	0,08
Черноморское	1927 – 2006	0,09	0,027	0,70	0,18	1,40	-0,01	-0,08
Евпатория	1923 – 2006	0,05	0,121	0,41	0,14	1,15	0,07	0,54
Севастополь	1923 – 2006	0,02	0,553	0,16	0,11	0,90	-0,02	-0,16
Херсонесский маяк	1923 – 2006	0,03	0,461	0,25	0,01	0,08	0,06	0,50
Ялта	1923 – 2006	0,05	0,151	0,41	0,02	0,16	0,11	0,90
Феодосия	1923 – 2006	0,08	0,035	0,66	0,19	1,56	0,06	0,50
Анапа	1923 – 2006	0,06	0,065	0,51	0,06	0,44	0,04	0,30
Новороссийск	1924 – 2006	0,10	0,015	0,82	0,29	2,12	- 0,16	-1,17
Туапсе	1924 – 2006	- 0,09	0,013	-0,66	0,00	0,00	- 0,15	-1,10
Сухуми	1924 – 1991	- 0,07	0,069	-0,49	-0,03	-0,21	-0,03	-0,18
Поти	1923 – 1991	-0,04	0,145	-0,29	-0,01	-0,09	- 0,12	-0,84
Батуми	1925 – 1995	- 0,11	0,000	-0,77	- 0,09	-0,63	-0,06	-0,42

Δ – общее изменение ("размах" тренда) температуры воды за расчетный период.

Подобная закономерность прослеживается при сравнении межгодовых изменений САК, как с данными отдельных станций, так и с осредненными по побережью (от Одессы до Батуми) годовыми величинами температуры воздуха. Таким образом, очевидна взаимосвязь межгодовой динамики индекса САК и колебаний температуры воздуха прибрежных регионов Черного моря в течение последнего столетия.

На короткопериодные климатические изменения в Европе важное влияние оказывают и межгодовые колебания температуры поверхности океана



Р и с . 6. Межгодовые колебания температуры воды у ЮБК. Ялта, 1900 – 2009 гг.

(ТПО) в Северной Атлантике. Сравнение заимствованного из [14] ряда среднегодовых величин ТПО (1948 – 1998 гг.) с рядом синхронных годовых величин температуры воздуха в Одессе показало, что влияние Северной Атлантики распространяется и на Черноморский регион. На обоих графиках рис.7, аппроксимированных по-



Р и с . 7 . Среднегодовые ряды температуры воды Северной Атлантики [14] и температуры воздуха в СЗЧ (Одесса), аппроксимированные полиномом 5-ой степени.

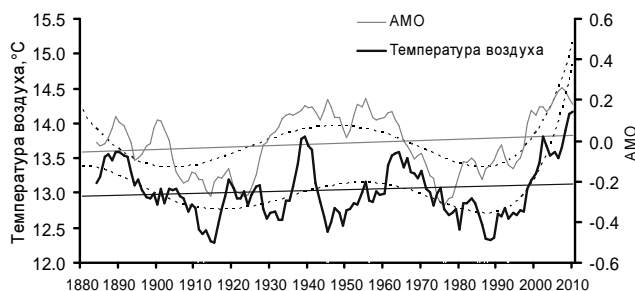
линомом 5-й степени, наблюдаются сходные тенденции: убывание температур в 60-е гг. и их возрастание в 90-е. Даже на масштабе нескольких лет колебания температур в основном синфазны. Аналогичные тен-

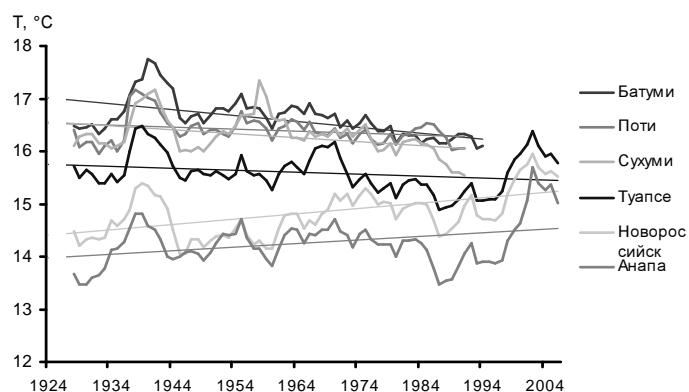
денции проявляются и в долгопериодных изменениях температуры воздуха в районе ЮБК и Атлантического мультидекадного колебания (АМО), представляющего изменение температуры воды на поверхности в Северной части Атлантического океана (рис.8). 129-летние ряды температуры воздуха и АМО имеют близкие положительные, статистически значимые линейные тренды. Полиномиальная аппроксимация показывает наличие одинаковых по фазе колебаний с периодом 70 – 80 лет, что вновь подтверждает влияние макроциркуляционных процессов над Атлантикой на восточно-европейский сектор и Черноморский регион [15].

Связь температур воды и воздуха (по крайней мере, в прибрежной зоне) подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции (r) годовых величин температуры воды и воздуха (средний по побережью $r = 0,84$), а также подобием (в большей части случаев) трендов, вычисленных за синхронные периоды. Максимальные значения $r = 0,85 - 0,93$ отмечены у северо-западного побережья, где угловые коэффициенты трендов температуры воздуха выше трендов температуры воды. Несколько ниже коэффициенты r оказались для района мыса Херсонес (0,74) и в юго-восточной части Кавказского побережья, где величины трендов воды и воздуха имеют наибольшие отличия или противоположные знаки. Однако, и в этих случаях корреляция рядов температур воды и воздуха достаточно высокая (0,68 – 0,77). Это означает, что в климатических изменениях температуры воды в прибрежной зоне Черного моря основной вклад принадлежит температуре воздуха.

У кавказского побережья на всех южных станциях (Туапсе, Пицунда, Сухуми, Поти и Батуми) годовые тренды температуры воды отрицательны (табл.2, рис.9). За исключением района Поти, тренды значимы на уровне 0,93 – 0,99 %. Общее понижение температуры за 67 – 70 лет здесь изменялось

Р и с . 8 . Межгодовая изменчивость температуры воздуха (Ялта) и АМО (5-ти летнее скользящее осреднение): линейные тренды (—), полином 5-й степени (- -). 1880 – 2009 гг.





Р и с . 9 . Межгодовые изменения температуры воды у восточного побережья Черного моря (скользящее 5-ти летнее осреднение). 1924 – 2006 гг.

от 0,3 (Поти) до 0,8°С (Пицунда, Батуми). Эти ряды ограничены 1991 – 1995 гг. и при их продлении до начала XXI в. величины угловых коэффициентов трендов изменятся, однако, пример Туапсе свидетельствует о том, что, несмотря на интенсивное потепление в конце XX – начале XXI вв., они могут остаться отрицательными и значимыми. Коэффициент линейного тренда ряда Туапсе (1923 – 2006 гг.) составил $-0,09$ °С/10 лет и значим на уровне > 95 %. Севернее Туапсе тренды аналогичных по длине рядов Анапы и Новороссийска положительны и значимы на уровнях 93 и 98 % соответственно.

Наиболее интенсивное охлаждение воды у юго-восточного побережья моря происходило, в основном, в летние сезоны, когда общее понижение температуры изменялось в пределах от $-0,2$ °С (Сухуми) до $-1,2$ °С (Новороссийск). В районе Батуми значимый отрицательный тренд зимнего сезона привел к понижению температуры воды на $0,6$ °С, а общее снижение температуры воды за рассматриваемые 70 лет составило $0,77$ °С (табл.2). Таким образом, климатические изменения температурного режима у восточного побережья Черного моря существенно отличаются от остальных прибрежных регионов. Для выяснения причин этих отличий и других особенностей температурного режима рассмотрим межгодовые изменения температуры отдельных месяцев года.

Внутригодовые изменения трендов температуры воды. В ряде работ, посвященных исследованию тенденций климатических изменений температуры воды Черного моря, отмечалось понижение температуры воды верхнего перемешанного слоя моря, особенно выраженное в зимние периоды второй половины XX века, когда его величина превысила 1 °С. В работе [3] предполагается, что понижение температуры связано с уменьшением притока речных вод в этот период и, соответственно, толщины верхнего зимнего перемешанного слоя, следовательно, его охлаждения. Авторы работ [4] и [5] считают, что одной из причин понижения температуры поверхностного слоя Черного моря в зимний период является, наоборот, увеличение стока рек и атмосферных осадков, выпадающих на поверхность моря в этот период, вызванные долгопериодными изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции. В работе [6] основной причиной знакоперемен-

ной структуры поля коэффициентов линейных трендов ТПМ (наличие областей прогрева и выхолаживания) считается волновой характер изменчивости ТПМ. Следует подчеркнуть, что в этих работах исследовалась температура всей акватории Черного моря, или температура верхнего слоя вод северо-западного шельфа. В данной работе рассматривается температура воды мелководной прибрежной зоны, которая подвержена общей тенденции повышения температуры больше, чем районы, удаленные от берегов. Тем не менее, как показано выше, в юго-восточной части прибрежной зоны Черного моря (Туапсе – Батуми) отмечены значимые отрицательные тренды, да и в северо-западной части некоторые летние тренды свидетельствуют о тенденции понижения температуры воды, что противоречит общему фону глобального потепления.

Для большей детализации тенденций внутригодовых изменений температуры воды были рассчитаны линейные тренды каждого месяца года за периоды 1923 – 2006 гг. Графики годового хода угловых коэффициентов месяч-

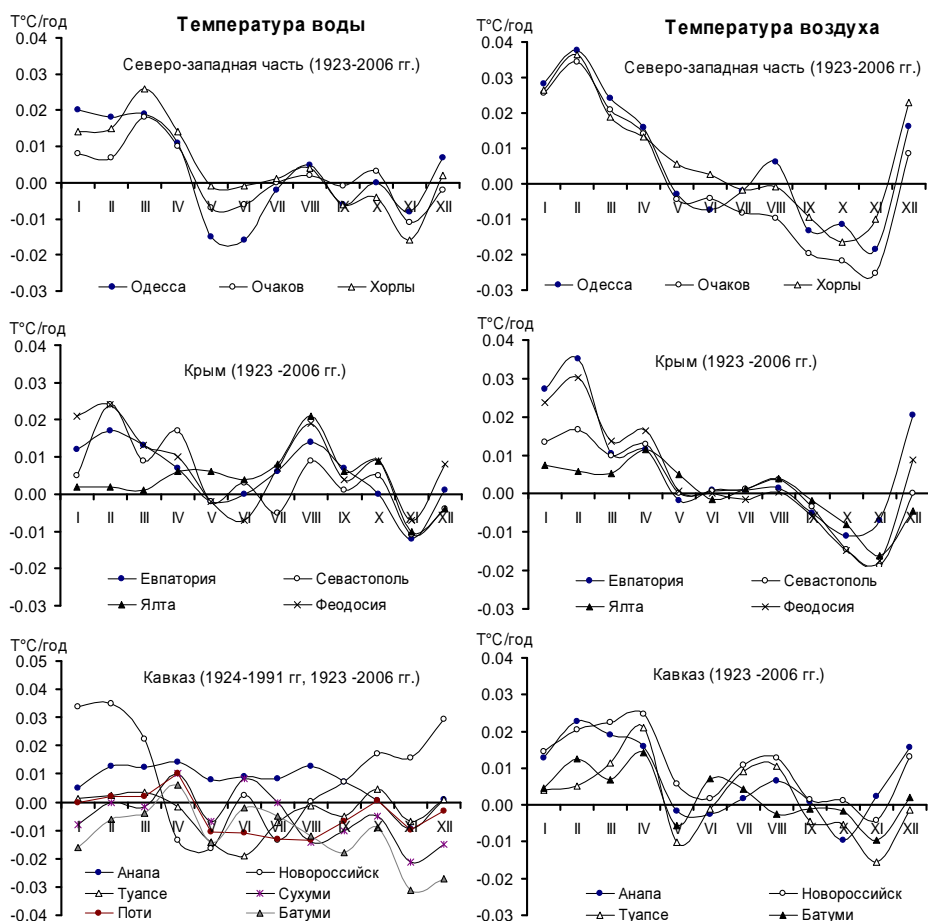


Рис. 10. Сезонный ход коэффициентов линейных трендов температуры воды и воздуха (T , °C/год), вычисленных за синхронные периоды с 1923 по 2006 гг. по данным береговых станций северо-западной части Черного моря, Крыма и Кавказа.

ных трендов температуры воды приведены на рис.10. Для сравнения, в правой части рисунка представлены аналогичные графики трендов температуры воздуха. В северо-западном и Крымском регионах, несмотря на то, что станции расположены в различных условиях прибрежной зоны, на разных широтах и на достаточно большом расстоянии друг от друга по долготе, выделяются общие синфазные колебания разных по величине и знаку коэффициентов трендов. Максимальные значения месячных трендов температуры и воды, и воздуха, т.е. общее климатическое повышение температуры, наступает в январе – марте, причем статистически значимые тренды температуры воздуха соответствуют январю и февралю, а температуры воды – марту. В мае – июне в северо-западной части выделяются очевидные отрицательные тренды температуры воды, значимые в районе Одессы на уровне 96 %. Учитывая, что в эти месяцы верхний прогретый слой в шельфовой зоне моря минимален (термоклин расположен непосредственно у поверхности), можно предположить, что понижения температуры воды у берега связаны с увеличением повторяемости ветровых сгонов и прибрежных апвеллингов под воздействием вдольбереговых западных и северо-западных ветров. Исследования межгодовой изменчивости величин повторяемости ветра по направлениям у северного побережья Черного моря показали наличие значимых положительных трендов ветров западного направления. В июле – августе у крымского побережья увеличение коэффициентов трендов, указывает на некоторое повышение температуры воды в летние периоды. Значимость трендов большей части рядов этих месяцев ниже 90 % уровня, однако августовский тренд Ялты, значимый на уровне 99 %, свидетельствует о реальности летнего потепления воды у берега за последние 83 года.

В осенние месяцы значимые отрицательные тренды рядов температуры воздуха показывают наличие общего похолодания во всех регионах прибрежной зоны от Одессы до Батуми. Интенсивное похолодание температуры воздуха в октябре подтверждается и трендами вековых (с 1881 г.) рядов температуры воздуха [2]. В поле температуры воды только ноябрь выделяется общим минимумом отрицательных значений трендов всех районов побережья, за исключением Новороссийска. Синфазное уменьшение незначимых трендов ноября (ниже 90 % уровня) подтверждается значимыми на уровне 99 % трендами юго-восточной части моря (Сухуми, Батуми, рис.10).

Различия в величинах месячных трендов и некоторые отличия в фазах и амплитудах их годового хода в отдельных пунктах, очевидно, отражают локальные климатические особенности. Кроме осеннего понижения температуры воздуха, наиболее вероятной причиной отрицательных месячных трендов температуры воды у северного побережья и на юго-востоке моря могут быть атмосферные осадки более холодные, чем поверхностные воды моря во все сезоны года. Установленным фактом является стабильная тенденция увеличения количества осадков, выпадающих на поверхность и берега Черного моря [16]. На юге кавказского побережья, выделяющегося как годовыми, так и месячными отрицательными трендами температуры воды, количество осадков максимальное. Среднегодовое количество осадков в районе Поти – Батуми (2000 – 2700 мм) в 4 – 5 раз превышает нормы осадков в других регионах Черного моря.



Рис. 11. Сезонный ход линейных трендов температуры воды ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$), осредненной по станциям северо-западной части (СЗЧ) и Крыма, а также объемов осадков ($\text{км}^3/\text{год}$), выпавших на поверхность Черного моря. (1923 – 2006 гг.).

Чтобы сравнить тенденции многолетней изменчивости атмосферных осадков и температуры воды используем данные синхронных рядов этих параметров. Расчет трендов атмосферных осадков выполнен по ряду месячных величин объемов осадков выпавших на поверхность Черного моря за период 1923 – 2006 гг. [16]. Для юго-восточной части использовался ряд месячных сумм слоя осадков, измеренных на станции Потти в период 1951 – 1991 гг.

График сезонного хода угловых коэффициентов линейных трендов осадков, совмещенный с графиками трендов температуры воды (средних для северо-западной части и Крыма) представлен на рис.11. Тенденции и величины трендов температуры воды и осадков в течение большей части года изменяются в противофазе. Наиболее контрастно выглядят изменения месячных трендов в осенний период, когда значимые на 95 % уровне положительные тренды осадков в сентябре и ноябре совпадают с минимумами трендов температуры воды, а в ноябре отрицательными для всего северного побережья Черного моря. Подобный сезонный ход трендов осадков подтверждается и вековыми рядами (1891 – 2006 гг.) фактических измерений осадков (Одесса, Очаков). Влияние осадков на гидрологические условия морских вод показал также сравнительный анализ месячных трендов осадков и солености воды [10]. В годовом ходе среднееголетних месячных коэффициентов линейных трендов осадков и солености отмечено наличие противофазовых изменений значимых трендов разного знака этих параметров, которые подтверждают вероятность распреснения морских вод при увеличении атмосферных осадков.

На кавказском побережье подобное сравнение тенденций осадков и температуры воды оказалось возможным провести только на основании ряда данных станции Потти, ограниченного вышеуказанным периодом. Для коррект-

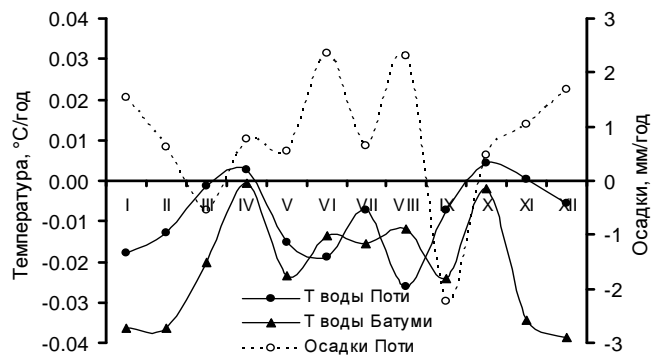


Рис. 12. Годовой ход месячных коэффициентов линейных трендов температуры воды ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$) и атмосферных осадков ($\text{мм}/\text{год}$) по измерениям на станциях Потти и Батуми. 1951 – 1991 гг.

ности сравнения тренды температуры воды были рассчитаны за те же 40 лет. Противофазовые изменения летних и зимних трендов осадков и температуры воды указывают на вероятность понижения температуры воды из-за увеличения количества атмосферных осадков (рис.12). Рассчитанные за тот же период (1951 – 1991 гг.) месячные тренды температуры воды по данным соседней станции Батуми показали аналогичный годовой ход коэффициентов линейных трендов, но с большими (в 2 – 3 раза) значимыми зимними трендами.

Эти результаты свидетельствуют о возможности понижения температуры воды под влиянием увеличивающегося количества осадков, по крайней мере, в осенний период на севере моря, а в юго-восточной части моря в течение зимних и летних периодов дождей. Если это так, то многолетние изменения количества осадков, имеющие значимый положительный тренд, могут быть одной из причин отрицательных месячных трендов температуры воды у северных берегов и на юго-востоке моря.

Заключение. Интенсивное глобальное потепление климата во второй половине XX века оказало влияние на температуру воды прибрежной зоны Черного моря. На общее повышение температуры воды в течение последнего двадцатилетия указывают полиномиальные тренды полных рядов температуры воды в прибрежной зоне (рис.5, 6 и 9). Рост температуры поверхностного слоя всей акватории Черного моря подтверждается регулярными спутниковыми измерениями ТПМ в период с 1985 по 2006 гг. Положительный тренд ТПМ (0,07 °С/год) привел к повышению температуры за 21 год более чем на 1,5 °С. При этом, общая тенденция и фазы межгодовых колебаний средней ТПМ согласуются с данными береговых наблюдений, за исключением юго-восточной части побережья Черного моря.

Основным фактором в климатических изменениях температуры воды прибрежной зоны на севере Черного моря является температура воздуха. В течение последнего столетия долгопериодные колебания приземной температуры воздуха в Черноморском регионе (70 – 80 лет) определяются циклами Северо-Атлантического колебания и Атлантического мультидекадного колебания, которые опосредованно влияют на климатические изменения температуры воздуха и воды в прибрежной зоне северного и северо-восточного побережий Черного моря.

В дополнение к причинам понижения температуры воды в Черном море, обсуждавшимся в работах [3 – 6], вероятными факторами, снижающими интенсивность потепления или понижающими температуру воды у берегов, являются ветровые сгоны, апвеллинги и атмосферные осадки. В восточной и юго-восточной частях Черного моря климатическое увеличение атмосферных осадков может быть основной причиной понижения температуры воды в прибрежной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проект "Моря СССР"*. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– Л.: Гидрометеоиздат, 1991.– 429 с.
2. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н.* Вековые изменения температуры воздуха в Черноморском регионе и их сезонные особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.–

- Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.444-456.
3. *Еремеев В.Н., Ефимов В.В., Суворов А.М., Шокуров М.В.* Аномальная климатическая тенденция изменения температуры Черного моря // Доп. НАН України.– 2001.– № 11.– С.91-95.
 4. *Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н.* О причине понижения поверхностной температуры Черного моря // Доп. НАН України.– 2003.– № 12.– С.108-111.
 5. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Тренд температуры и солёности деятельного слоя в Черном море во второй половине XX века и его возможные причины // Изв. РАН. ФАО.– 2004.– 40, № 6.– С.832-840.
 6. *Еремеев В.Н., Горячкин Ю.Н., Жуков А.Н., Крашенинникова М.А., Сизов А.А.* Исследование знакопеременной структуры линейных трендов поверхностной температуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.18.– С.236-241.
 7. *Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В.* Температура поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986 – 2002 гг.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005.– 263 с.
 8. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1992.– 243 с.
 9. *Куклин А.К., Куклина Н.Я., Шабалина О.А.* Исследование гидрометеорологических характеристик ЮБК с океанографической платформы в Кацивели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.2(7).– С.66-82.
 10. *Иванов В.А., Репетин Л.Н., Мальченко Ю.А.* Климатические изменения гидрометеорологических и гидрохимических условий прибрежной зоны Ялты / Препринт МГИ НАН Украины.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– 164 с.
 11. *Репетин Л.Н., Романов А.С., Чурилова Т.Я.* Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе южного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.205-227.
 12. *Бриллинджер Д.* Временные ряды. Обработка данных и теория.– М.: Мир, 1980.– 536 с.
 13. *Durbin, J.* Testing for serial correlation in least-squares regression when some of the regressors are lagged dependent variables // *Econometrica*.– 1970.– 38.– P.410-421.
 14. *Покровский О.М.* Изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике и колебания климата Европы // Исследования Земли из космоса.– 2005.– № 4.– С.24-34.
 15. *Полонский А.Б.* Атлантическая мультideкадная осцилляция и её проявления в Атлантико-Европейском регионе // Морской гидрофизический журнал.– 2008.– № 4.– С.69-79.
 16. *Репетин Л.Н., Долотов В.В., Липченко М.М.* Пространственно-временная и климатическая изменчивость атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.428-443.

Материал поступил в редакцию 16.04.2012 г.

АНОТАЦІЯ. Надані результати аналізу багаторічних вимірів температури води (до 109 років) і повітря (до 128 років) біля берегів північно-західної частини Чорного моря, Криму та Кавказу. Досліджені кліматичні зміни температури води і повітря на міжрічному, сезонному та місячному масштабах. Показано, що на півночі Чорного моря головною причиною загального підвищення температури води є позитивні тренди температури повітря. Чинниками, що зменшують інтенсивність потепління або знижують температуру води, є вітрові згони, прибережні апвеллінги і атмосферні опади. У південно-східній частині узбережжя Чорного моря загальна тенденція збільшення атмосферних опадів є головною причиною від'ємних трендів температури води, незважаючи на інтенсивне потепління у кінці XX – початку XXI століть.

ABSTRACT. The results of long-term measurements of water (up to 109 years in duration) and air (up to 128 years) temperatures are presented for the Black Sea coastal zone of NW part, Crimea and Caucasus. Climatic changes of water and air temperature regime are investigated on interannual, seasonal and monthly scales of variability. It is shown that the main reason of general temperature rise in the northern part of the Black Sea is positive trend of air temperature. Factors reducing the warming intensity or even lowering the water temperature are wind-driven shallow and deep-water coastal upwellings and atmospheric precipitations. In the SE part of the Black Sea shores, general tendency of precipitation amount rise is the main reason of negative trends of water temperature, in spite of intensive warming in the end of XX – beginning of XXI centuries.