

УДК 551.526

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ПОВТОРЯЕМОСТЬ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2018 г. В. В. Ефимов, О. И. Комаровская

*Морской гидрофизический институт, Севастополь, Россия**e-mail: vefim38@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.09.2016 г., после доработки 18.04.2017 г.

По данным спутниковых измерений температуры поверхности моря построены композиты теплых и холодных аномалий температуры и распределение частоты повторяемости дней с аномалиями температуры для четырех календарных сезонов года. Выделены области формирования холодных аномалий в северо-западной части и теплых – в северной и северо-восточной частях моря, связанных с адвекцией Основным черноморским течением. Оценены функции распределения величин аномалий температуры и время жизни холодных и теплых аномалий. Рассмотрен вероятный физический механизм генерации холодной аномалии в юго-восточной краевой части моря, связанный с экмановской подкачкой холодной воды из термоклина.

DOI: 10.7868/S0030157418020016

ВВЕДЕНИЕ

Определим крупномасштабные аномалии температуры поверхности Черного моря как пространственные аномалии, имеющие масштабы от нескольких десятков до сотни километров, т.е. на порядок меньшие размеров моря. К ним в длинноволновой области примыкают аномалии температуры, имеющие масштаб всего моря, а в коротковолновой – мезомасштабные аномалии на масштабе бароклинного радиуса Россби $\sim 20\text{--}25$ км. В настоящее время такие крупномасштабные аномалии мало изучены. Известны разрозненные измерения температуры на отдельных разрезах во время проведения судовых полигонных исследований, выполнявшихся в Черном море (например, [11]). Но они не позволяли проследить развитие во времени и пространстве таких аномалий и составить представление об их локализации и статистике. Среди возмущений в состоянии моря на крупных масштабах можно выделить аномалии температуры поверхности (ТПМ), связанные с взаимодействием с атмосферой. К одним из наиболее сильных воздействий относятся вторжения холодного воздуха через северную и северо-восточную границу региона в осенний и зимний периоды года. В некоторых случаях в зимний период температура вторгающегося северного воздуха опускается до -10 – -15 °С, а скорость приповерхностного ветра доходит до $15\text{--}20$ м/с [5]. Известны также вторжения холодного воздуха через северо-восточную границу черноморского региона, вызывающие Новороссийскую бору. Такие вторжения могут

приводить к понижению поверхностной температуры и далее к формированию холодного промежуточного слоя в зимний период за счет глубокой конвекции. Так, в работе [10] предполагалось, что в центрах восточного и западного циклонического круговорота из-за подъема пикноклина и меньшей глубины верхнего квазиоднородного слоя при вторжении холодного воздуха холодная поверхностная вода за счет конвективного перемешивания проникает до глубины $35\text{--}50$ м. Из этих районов вода холодного промежуточного слоя растекается к периферии, опускаясь до $70\text{--}80$ м. Однако и в этих случаях величины поверхностных температурных аномалий в центрах круговоротов в общем невелики. Так, по данным экспедиционных исследований [11], аномалии оказывались менее 1 °С. Причины этого становятся понятными, если учесть, что эпизоды сильных холодных вторжений достаточно кратковременны (не более $1\text{--}2$ дней). За это время даже большие потоки тепла через поверхность не могут значительно понизить температуру всего поверхностного слоя. Например, суммарный поток явного и скрытого тепла в 500 Вт/м² за время одного из таких сильных холодных вторжений [5] мог привести за счет конвективного перемешивания к понижению температуры верхнего $30\text{--}40$ -метрового слоя воды всего на $0.3\text{--}0.4$ °С/сут. Хотя, безусловно, продолжительные холодные атмосферные аномалии могут приводить и к более значительным аномалиям ТПМ конвективного происхождения.

Более значительные холодные аномалии в центральных частях моря могут быть результатом динамического фактора – возбуждения сильных ветровых течений в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) и потери его устойчивости, приводящей к вовлечению холодной воды из термоклина и быстрому увеличению глубины ВКС. В Черном море, как относительно динамически спокойном бассейне, в летний период развивается хорошо выраженный неглубокий (до ~ 15 м) верхний теплый квазиоднородный слой. Его заглупление в летний и осенний периоды под действием ветра и вовлечения холодной воды из термоклина может также служить причиной возникновения значительных холодных аномалий. Один из примеров таких значительных отрицательных аномалий поверхностной температуры в осенний период в центральной части моря был численно изучен в работе [4]. Ранее в работе [6] было выполнено моделирование холодной аномалии, наблюдавшейся в прибрежной части моря вблизи кавказского побережья в летний период года и имевшей такую же динамическую природу. Наконец, в мелководных северо-западных прибрежных районах моря на поверхностную температуру могут существенно влиять изменения синоптической обстановки, такие, как вторжения прибрежного холодного воздуха или периоды безветренной солнечной погоды.

К важному динамическому фактору формирования аномалий ТПМ в Черном море также относится система поверхностной циркуляции в Черном море и ее главная составляющая – Основное черноморское течение (ОЧТ). Это течение достаточно хорошо изучено, имеет хорошо выраженный годовой ход [7, 13] и представляет собой циклическую циркуляцию, локализованную в западной, южной и восточной части моря на расстояниях от 40 до 100 км от берега. Оно достигает максимального развития в зимне-весенний период со скоростями до 0.5–0.7 м/с и почти затухает летом. ОЧТ можно рассматривать как один из главных адвективных механизмов формирования неоднородностей температуры в Черном море.

В прибрежных мелководных областях моря холодные аномалии в весенне-летний период могут быть связаны с экмановским апвеллингом, при соответствующем вдольбереговом ветре [2, 8]. Однако апвеллинг имеет в основном все же меньший мезомасштаб в поперечном берегу направлении. Так, радиус деформации бароклинной моды, связанной с сезонным термоклином и определяющей масштаб апвеллинга, составляет всего 3–5 км [8]. Хотя в некоторых случаях под влиянием вдольбереговых течений и их меандров пятна холодной воды могут распространяться дальше от берега в область внешнего края шельфа.

Как правило, мезомасштабные аномалии ТПМ являются следствием вихреобразования, и они хорошо прослеживаются по спутниковым данным [9, 14, 16]. Наиболее развиты мезомасштабные аномалии в прибрежных областях Черного моря, где вихреобразование является результатом сдвиговой неустойчивости ОЧТ. Анализ мезомасштабных аномалий ТПМ выходит за рамки нашей статьи, поэтому лишь отметим, что, несмотря на то, что сейчас в основном известны и изучены физические механизмы формирования мезомасштабных аномалий, сведения об их климате – осредненной пространственной структуре, повторяемости и других статистических характеристиках – по существу отсутствуют. Таким образом, мезомасштабные вихри не разрешаются в исходных данных, а прибрежный апвеллинг может лишь частично выделяться в прибрежных точках расчетной области моря.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Для масштабов, больших ~ 25 км, новые возможности построения климатических характеристик крупномасштабных аномалий ТПМ дает использование данных дистанционного зондирования. В первую очередь можно выделить доступную систематизированную базу данных дистанционного зондирования: NOAA-ESRL (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) [15]. Данные по ТПМ охватывают большой промежуток времени (с 1982 г. по настоящее время) и основаны на систематизации и обобщении двух наиболее развитых методов дистанционного зондирования температуры. Первый заключается в использовании инфракрасного радиометра с высоким пространственным разрешением, второй – микроволнового сканирующего радиометра. Исходные данные по ТПМ согласовывались с *in situ* буйковыми и судовыми данными с целью коррекции измерений и подвергались оптимальной интерполяции в узлы регулярной сетки с пространственным разрешением 0.25° и временным 1 сутки.

Наличие долговременных данных ТПМ позволяет достаточно просто выделять температурные аномалии за большой промежуток времени. В то же время для изучения их свойств необходимы данные об атмосферном форсинге – потоках тепла, влаги и трении на границе раздела вода – воздух. К настоящему времени был выполнен реанализ атмосферной циркуляции для Черноморского региона за 1970–2014 гг. с использованием региональной модели атмосферной циркуляции RegCM с пространственным разрешением 25×25 км [1]. Полученные данные о потоках тепла, влаги и скорости ветра также были использованы для описания условий возникновения мезомасштабных аномалий.

Исходный массив данных NOAA-ESRL составляют ежесуточные поля самих величин ТПМ и аномалий ТПМ за 1982–2014 гг. с разрешением 0.25° . В этом массиве аномалии определялись по отношению к климатическому годовому ходу температуры, заданному интерполяцией месячных нормалей. Подробное описание методики получения данных, их характеристики детально описаны в [15]. Эта база данных является ежедневно пополняемой. Предварительная обработка массива данных за 34-летний период с 1982 по 2014 гг. включительно показала, что во временных рядах аномалий среднегодовой температуры Черного моря наблюдается незначительный тренд – повышение на 1.5°C , причем это повышение в основном пришлось на вторую половину периода. Кроме того, на фоне положительного тренда температуры в рядах среднегодовых аномалий ТПМ наблюдались межгодовые вариации, составляющие до $\pm 0.5^\circ\text{C}$, а осредненные по акватории моря ежесуточные аномалии ТПМ изменяются по отношению к тренду в пределах $\pm 3^\circ\text{C}$.

Рассмотрим методику обработки данных. Исходные временные ряды аномалий ТПМ содержат временной тренд и долгопериодную изменчивость, являющуюся реакцией всего моря в целом на различные виды глобальных атмосферных процессов. Как указывалось, их величины не являются малыми. Такие долгопериодные колебания являются откликом теплового режима Черного моря на внешний, глобальный форсинг. В то же время нашей задачей являлось выделение пространственных аномалий ТПМ, занимающих некоторую ограниченную область моря, с целью их систематизации и отнесения к тем или иным внутренним в системе Черное море – атмосфера процессам. Поэтому для исключения долгопериодной изменчивости на первом этапе обработки данных вводилась коррекция – поля исходных ежесуточных аномалий ТПМ пространственно центрировались, т.е. из них вычитались ежесуточные значения аномалий ТПМ, осредненные по площади моря. Таким образом, локальная аномалия в точке моря считалась теплой/холодной, если ее величина была большей/меньшей по сравнению с осредненной по всей площади моря величиной. Конечно, пространственное центрирование можно отнести лишь к первому приближению высокочастотной фильтрации пространственных полей. Его можно наглядно пояснить в простом случае одной локальной холодной или теплой аномалии ТПМ, занимающей ограниченную область моря, на порядок меньшую размеров моря. Так, при нулевых исходных величинах аномалии ТПМ в избранной области (равных нулю), но при положительной величине аномалии в окружающей области моря, равной, например, 2°C , мы считаем эту область крупномасштабной

холодной пространственной аномалией с величиной аномалии ТПМ около -2°C (но не окружающее море аномально теплым). Для общего случая широкого пространственного спектра аномалий в ограниченном море трудно количественно оценить погрешности такой простой пространственной фильтрации. В любом случае исключаются погрешности, связанные с внешним по отношению к системе Черное море – атмосфера форсингом.

Отметим, что предварительно нами были проведены расчеты с использованием нефильтрованных данных. Хотя некоторые наиболее крупномасштабные особенности аномалий при этом качественно сохранялись, но более тонкие детали пространственной структуры аномалий, особенно в крайних областях, размывались. Поэтому полученные нами результаты систематизации крупномасштабных аномалий, в первую очередь количественные оценки их повторяемости, непосредственно связаны с условием выбора процедуры пространственного центрирования.

Далее пространственно центрированные ежесуточные поля аномалий разделялись отдельно на поля положительных и отрицательных по знаку. Затем все поля группировались по сезонам и, наконец, вычислялись композиты полей, т.е. средние за весь 34-летний период поля положительных и отрицательных аномалий, превышающих по абсолютной величине заданные пороговые значения.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПОВТОРЯЕМОСТЬ АНОМАЛИЙ

Ниже будут показаны композиты аномалий для четырех календарных сезонов года. Вообще говоря, можно было группировать аномалии по отношению к “океанологическим” сезонам – сдвинутым вперед по времени. Но ранее выполненный нами региональный климатический реанализ [1] был сгруппирован по календарным сезонам, как правило, принимаемым в климатических исследованиях, а кроме того, хотелось более явно выделить осенние холодные аномалии, усиливающиеся обычно в сентябре месяце, и не “растворять” их в более спокойном летнем сезоне.

На рис. 1 представлены композиты крупномасштабных положительных аномалий, превышающих заданное пороговое значение (далее просто “теплые аномалии температуры”), а на рис. 2 – композиты крупномасштабных отрицательных аномалий температуры ниже заданного порогового значения (далее “холодные аномалии температуры”). Там же даны изолинии повторяемости аномалий температуры, определенные как относительное число дней для данного сезона за 34 года

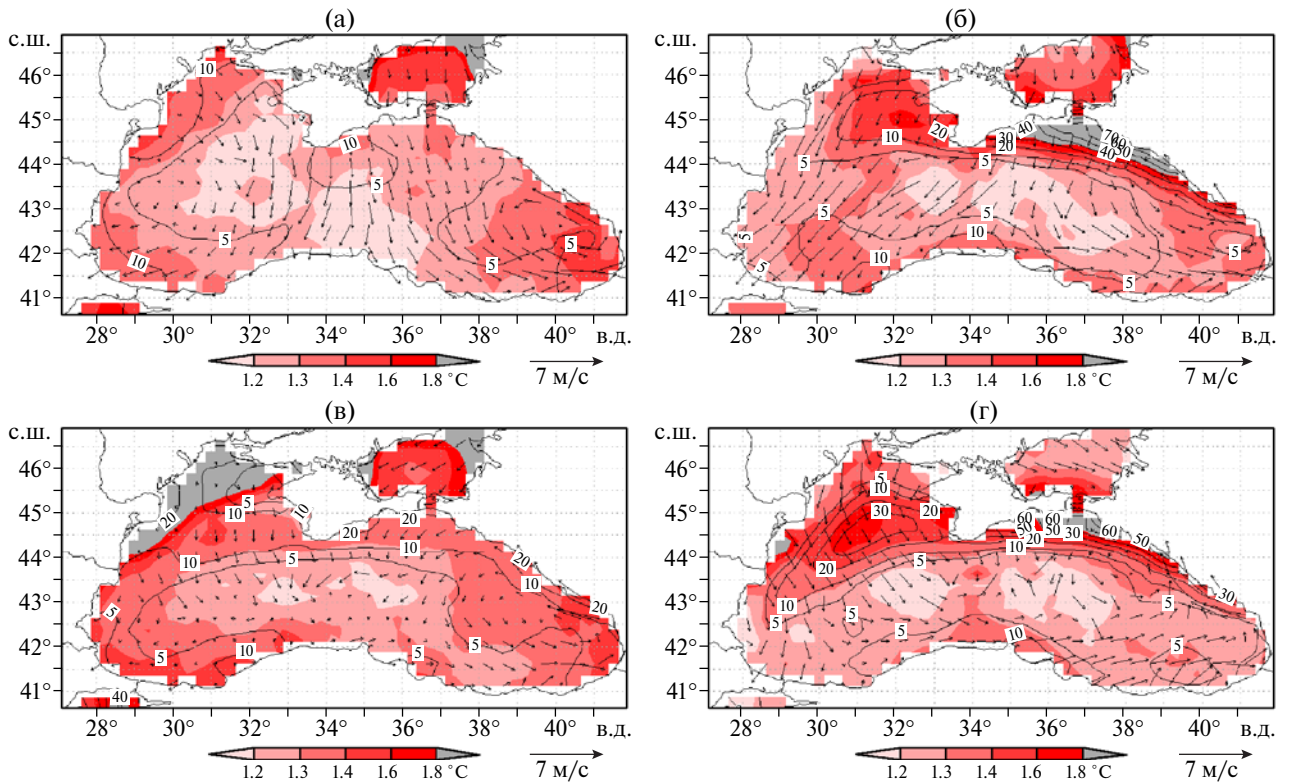


Рис. 1. Композиты положительных аномалий температуры выше 1°C (цветовые градации), повторяемость аномалий (изолинии) и средние значения векторов скорости ветра в летние (а), осенние (б), зимние (г) и весенние (в) периоды 1982–2014 гг.

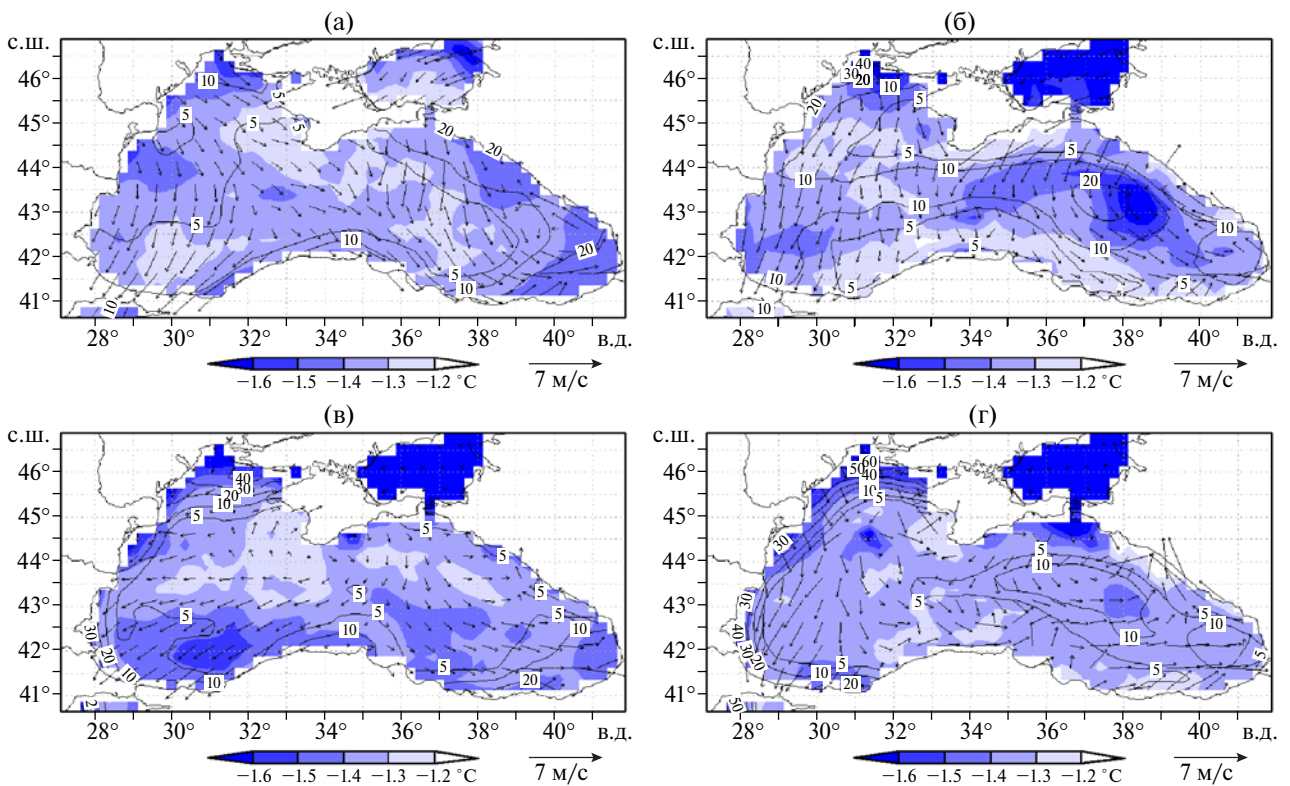


Рис. 2. Композиты отрицательных аномалий температуры ниже -1°C (цветовые градации), повторяемость аномалий (изолинии) и средние значения векторов скорости ветра в летние (а), осенние (б), зимние (г) и весенние (в) периоды 1982–2014 гг.

с аномалией ТПМ выше (для теплых аномалий) или ниже (для холодных аномалий) порогового значения. Кроме того, показаны средние значения векторов скорости ветра, выбранных из всего массива данных регионального реанализа [1] для тех дней, на которые приходятся соответствующие аномалии.

1. Лето (июнь, июль, август). Рассмотрим особенности холодных и теплых аномалий отдельно по сезонам года, начиная с более простого – летнего распределения (рис. 1а, 2а). ОЧТ в летний период развито слабо, поэтому и теплые и холодные аномалии развиваются под действием локальных факторов. С эпизодами усиления прибрежного ветра и заглуплением ВКС можно связать области холодных аномалий на северо-востоке (район Анапы – Туапсе) и юго-востоке (район Батуми). Здесь повторяемость дней с холодными аномалиям, меньшими $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляет около 20%. Один из таких случаев был детально изучен в работе [6]. Выделяются также небольшие области холодных аномалий в северо-западной части моря, имеющие меньшую повторяемость. Теплые аномалии с повторяемостью около 10% летом приходятся на прибрежные мелководные западные части моря и область южного берега Крыма, и с повторяемостью 5% – на юго-восточную.

2. Осень (сентябрь, октябрь, ноябрь). Как следует из рис. 1б, 2б, для осеннего периода наиболее повторяемые и большие по величине холодные аномалии развиваются в центральной западной половине моря и имеют ветровое происхождение – заглупление ВКС. Они рассмотрены и численно воспроизведены в работе [4], поэтому на них останавливаться не будем. Наиболее повторяемые холодные аномалии также характерны для северо-западной области. Теплые аномалии в этот период здесь не образуются.

Можно отметить также область холодных аномалий с повторяемостью около 10% на юго-востоке (район Батуми). Одним из вероятных механизмов возбуждения этой аномалии можно рассматривать характерную особенность поля скорости ветра – значительную циклоническую завихренность. Она качественно видна из поведения средних векторов скорости ветра на рис. 2б, и количественно представлена в виде поля завихренности напряжения ветра τ на поверхности, оцененного по данным регионального реанализа [1]: $\tau = \rho \cdot C_a \cdot |\mathbf{U}| \cdot \mathbf{U}$, где ρ – плотность воздуха, $C_a = 1.5 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент сопротивления, \mathbf{U} – вектор скорости ветра. Осредненные значения вихря напряжения ветра $\text{rot}\tau$, соответствующие отрицательным аномалиям температуры, меньшим $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены на рис. 3. Можно дать грубую оценку влияния на формирование

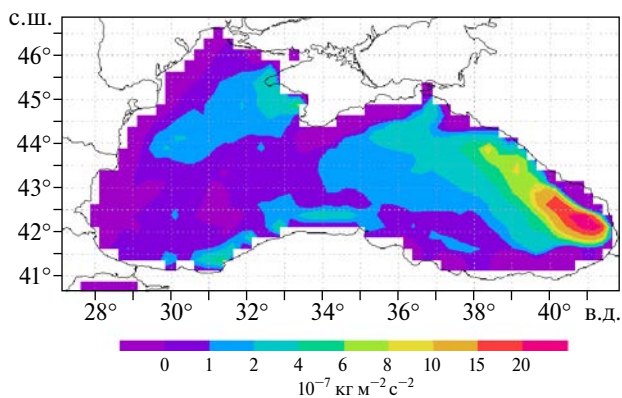


Рис. 3. Среднее значение величины вихря напряжения ветра на поверхности $\text{rot}\tau$ для отрицательных аномалий ниже $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в осенние периоды 1982–2014 гг.

аномалии ТПМ такой локальной завихренности. Циклоническая завихренность вызывает на нижней границе ВКС направленную вверх экмановскую вертикальную скорость $w = \text{rot}\tau / \rho_w \cdot f$, где $\rho_w = 10^3\text{ кг м}^{-3}$ – плотность воды, а $f = 10^{-4}\text{ с}^{-1}$ – параметр Кориолиса. Показанным на рис. 3 значениям $\text{rot}\tau \sim 1.5 \cdot 10^{-6}\text{ кг м}^{-2}\text{ с}^{-2}$ соответствуют вертикальные скорости в центре вихря около $1.5 \cdot 10^{-5}\text{ м/с}$, что, с учетом 10% повторяемости холодных аномалий температуры в осенний сезон, дает оценку среднесезонной величины скорости w на нижней границе ВКС около $1.5 \cdot 10^{-6}\text{ м/с}$. Принимая глубину ВКС равной 15–20 м, а перепад температур на его нижней границе $\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, получим грубую оценку среднесезонной величины холодной аномалии температуры $\Delta T = 5^{\circ} \cdot w \cdot 91\text{ (день)} / (15-20)\text{ м} \sim 2.9^{\circ}-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конечно, это несколько завышенная оценка, т.к. не учитывает, например, адвекцию холодной воды ОЧТ из этой области. Хотя можно полагать, что адвективный перенос в этом районе Черного моря не является важным. Так, например, согласно численным расчетам, здесь ОЧТ отклоняется от берега и образует область квазистационарной антициклонической циркуляции вод, где адвекция не является определяющей [3].

Наиболее характерной особенностью распределения теплых аномалий температуры в осенний период является хорошо выраженная северо-восточная область с повторяемостью до 70%, продолжающаяся далее, но с меньшей повторяемостью, на северо-восток за Крымский полуостров. Здесь аномалии являются результатом воздействия ОЧТ, переносящего теплую воду из юго-восточного региона моря.

Приведенные на рис. 1 и 2 композиты описывают средние величины аномальной температуры и повторяемость дней с аномальной температурой. В то же

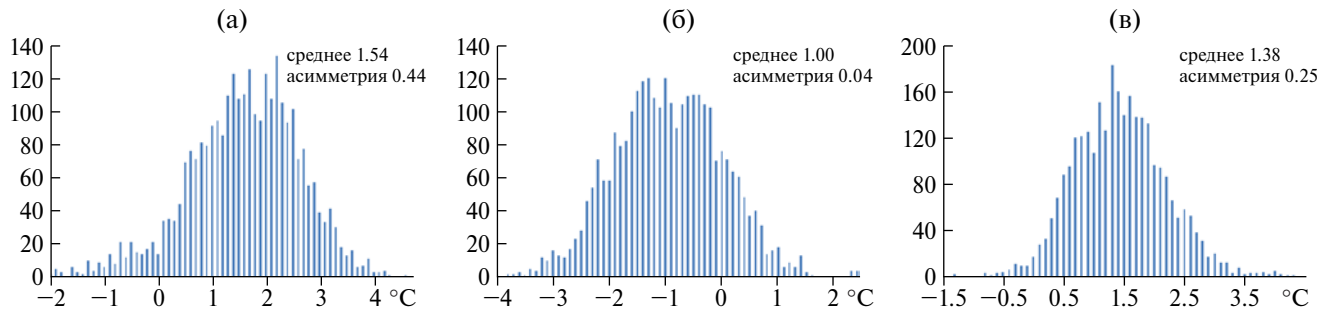


Рис. 4. Гистограммы величин аномалий температуры за осенние периоды 1982–2013 гг. в точке 44.5° с.ш., 37.5° в.д. (а), за зимние периоды 1982–2014 гг. в точках 46.0° с.ш., 31.5° в.д. (б) и 44.5° с.ш., 37.5° в.д. (в).

время интересно рассмотреть распределение самих величин (не композитов) аномалий ТПМ в отдельных точках характерных районов моря и оценить время жизни самих теплых и холодных аномальных событий. На рис. 4 приведены гистограммы, дающие представление о распределении величин аномалий ТПМ, а на рис. 5 – автокорреляционные функции отдельных выбранных положительных и отрицательных значений аномалий температуры, определяющие время жизни этих аномалий по времени коррелированности значений.

Гистограммы и автокорреляционные функции для северо-восточной прибрежной области теплых аномалий (в точке с координатами 44.5° с.ш., 37.5° в.д.) для осеннего периода представлены на рис. 4а и 5а. Как видно из гистограммы, в этой северо-восточной прибрежной области преобладают положительные аномалии температуры, что хорошо согласуется с повышенной повторяемостью дней с аномалией ТПМ, большей 1°C , приведенной ранее на рис. 1б. Время жизни теплых аномалий также больше, чем холодных. Грубо оценивая радиус временной корреляции по уровню 0.2, можно получить, что теплые аномалии имеют здесь среднее время жизни 20, а холодные – 5 суток. Хотя, конечно, оценка времени жизни отрицательных аномалий в силу малости их числа для этого района менее достоверна.

3. Зима–весна. В этот период холодные аномалии (рис. 2в, 2г) сосредоточены в основном в прибрежной западной области моря. Зимой они с достаточно высокой повторяемостью (до 30–40%) занимают всю западную и юго-западную части прибрежных районов Черного моря. Причем отчетливо виден источник этих холодных аномалий – северная сравнительно мелководная часть моря. Можно рассмотреть вероятную причину их возникновения – вторжение холодных зимних масс воздуха через северную границу региона, формирование холодных аномалий в прибрежных мелководных областях и их последующая адвекция вдоль берега на юг. Весной холодные аномалии температуры в этой части также сохраняются, но с несколько меньшей повторяемостью.

Гистограмма аномалий температуры для зимы в северо-западной прибрежной точке моря с координатами 46° с.ш., 31.5° в.д. показана на рис. 4б. Как видно, для зимнего периода распределение существенно асимметрично – преобладают отрицательные аномалии температуры, значения которых доходят до $-3, -4^{\circ}\text{C}$. Холодные аномалии имеют среднее время жизни около 27 суток, а теплые – около 7 суток (см. рис. 5б). Таким образом, для этой крайней северо-западной части моря характерно развитие зимой сильных холодных аномалий температуры, имеющих повторяемость до

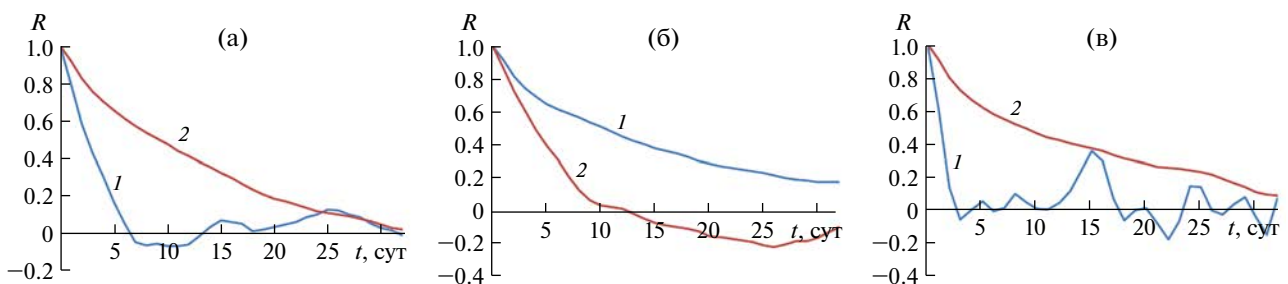


Рис. 5. Автокорреляционные функции холодных (1) и теплых (2) величин аномалий ТПМ за осенние периоды 1982–2014 гг. в точке 44.5° с.ш., 37.5° в.д. (а), за зимние периоды 1982–2014 гг. в точках 46.0° с.ш., 31.5° в.д. (б) и 44.5° с.ш., 37.5° в.д. (в).

50–60%, распространяющихся далее вдоль берега на юго-запад. В литературе они рассматриваются как один из основных источников пополнения холодного промежуточного слоя в Черном море [7, 10, 12, 13].

Для зимы в центральной западной части моря так же, как и для осени, выделяется область отрицательных аномалий. Однако их повторяемость приблизительно в два, а величины – в полтора раза меньше осенних. В работе [4] было показано, что большие холодные аномалии являются долгоживущими, так что зимние аномалии, представленные на рис. 2г, в этой части моря могут быть просто остаточными осенними аномалиями. Хотя для каждого значительного аномально холодного эпизода целесообразно выполнить детальный анализ. Здесь же приводится лишь статистика – повторяемость холодных аномалий.

Наиболее сильными и повторяющимися для зимнего периода являются теплые аномалии, занимающие всю северо-восточную и северную части моря. Их повторяемость в северо-восточной части доходит до 60–70%, а величины до 3–4 °С (см. гистограмму на рис. 4в). Очевидно, что причиной их возникновения так же, как и для осеннего периода, является ОЧТ – адвекция теплых вод из южных районов моря. Повторяемость теплых аномалий в северном прикерченском районе моря доходит до 60%. Как видно из гистограммы, практически все аномалии в этой области являются положительными, их время жизни – большое, как и для осенних аномалий, и составляет около 25 суток (см. рис. 5в). Оценка времени жизни отрицательных аномалий в силу малости их числа недостоверна. Таким образом, аномалии температуры во всем северном и северо-западном районах Черного моря в зимний период, как и в осенний, определяются ОЧТ.

Весной наличие ОЧТ не приводит к возникновению теплых аномалий в северной и северо-восточной прибрежных частях, т.к. нет источника относительно теплой воды в этот период. Теплые аномалии возникают лишь в самой прибрежной западной части моря и северной мелководной части. Вероятно, они являются следствием локальных синоптических ситуаций (периоды теплых безветренных солнечных дней). Поскольку такие аномалии не являются глубокими, их время жизни невелико, повторяемость также невелика – около 5%, и ОЧТ в западной части моря не формирует протяженную зону прибрежных аномалий температуры (такую, как область холодных аномалий в зимний период).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были использованы 34-летние спутниковые данные NOAA-ESRL температуры Черного моря для выделения крупномасштабных аномалий

температуры – на масштабах, на порядок меньших размеров Черного моря, но больших бароклинного радиуса Россби. Для выделения аномалий на фоне глобальной атмосферной изменчивости применена процедура пространственного центрирования. Рассмотрена пространственная структура композитов теплых и холодных аномалий температуры и распределение по акватории моря повторяемости с аномалиями ТПМ для четырех сезонов года.

Показано, что в осенне-зимний период в северо-восточной прибрежной части моря от кавказского побережья до Крыма преобладают теплые аномалии температуры, находящиеся в области ОЧТ. Повторяемость дней с аномалиями температуры, большими 1 °С, достигает 50–60%. Оценены времена жизни теплых и холодных температурных аномалий. Для осенне-зимнего периода время жизни теплых аномалий в области ОЧТ значительно превышает время жизни холодных.

В зимний период в прибрежной северо-западной и западной частях моря преобладают холодные аномалии, имеющие большее время жизни по сравнению с теплыми. Источником холодных аномалий температуры в этой области является мелководная северо-западная часть Черного моря.

В центральной части моря в осенний период выделяется область хорошо выраженных и достаточно повторяемых холодных аномалий температуры, связанных с заглуплением ВКС под действием ветра. Численное моделирование одной из сильных аномалий в этой области было выполнено ранее [4].

Рассмотрен механизм развития холодной осенней аномалии температуры в юго-восточной краевой области Черного моря. Показано, что локальная завихренность скорости приводного ветра может привести к экмановскому подъему холодной воды из термоклина в ВКС и формированию холодной аномалии.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001 (шифр “Климат”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов А.М., Яровая Д.А., Барабанов В.С. Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // Морск. гидрофиз. журнал. 2015. № 4. С. 14–28.
2. Горячкин Ю.Н. Характеристики прибрежного апвеллинга у Южного берега Крыма // ЭКОСИ-ГИДРОФИЗИКА, Севастополь, 2005. С. 30–31.
3. Демьшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции

- в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 655–661.
4. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Аномалии температуры поверхности Черного моря и моделирование формирования интенсивной холодной аномалии сентября 2014 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 389–398.
 5. *Ефимов В.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование конвекции в атмосфере при вторжении холодного воздуха над Черным морем // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50. № 6. С. 1–11.
 6. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. и др.* Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 176–192.
 7. *Иванов В.А., Белокопытов В.В.* Океанография Черного моря // Морск. гидрофиз. институт НАН Украины, 2011 г. 212 с.
 8. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н.* Апвеллинг в Черном море // Морск. гидрофиз. институт НАН Украины, 2008 г. 91 с.
 9. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 65–77.
 10. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 1987. Т. 27. № 5. С. 739–746.
 11. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Особенности формирования холодного промежуточного слоя в Черном море при экстремальных зимних условиях // Тр. ГОИН. 1990. Вып. 190. С. 132–151.
 12. *Полонский А.Б., Попов Ю.И.* Условия формирования вод холодного промежуточного слоя Черного моря, Севастополь, МГИ НАН Украины, 2011. 54 с.
 13. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н.* Гидрология и динамика вод Черного и Азовского морей // Водные массы океанов и морей, М.: МАКС-пресс, 2007. С. 189–207.
 14. *Kubryakov, A.A., Stanichny, S.V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers, 2015. V. 97. P. 80–91.
 15. *Reynolds R.W., Thomas M.S., Chunying L. et al.* Daily High Resolution Blended Analyses for Sea Surface Temperature // J. Clim. 2007. V. 20. P. 5473–5496.
 16. *Zatsepin, A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C8. 3246, doi:10.1029/2002JC001390.

Spatial Structure and Repeatability of Large-Scale Anomalies of the Black Sea Surface Temperature

V. V. Efimov, O. I. Komarovskaya

According to satellite measurements of sea surface temperature composites of warm and cold temperature anomalies were built and recurrence frequency distribution of days with the temperature anomalies for the four seasons of the year was done. The areas of cold anomalies forming are selected in north-western part and of warm ones – in north and north-eastern part of sea, related to advection by main Black Sea current. The distribution functions of temperature anomalies values and the lifetime of the cold and warm anomalies are estimated. A likely physical mechanism of generation of cold anomaly in the south-eastern boundary of the sea, related to the Ekman pumping cold water from the thermocline, is considered.