

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ КОНЦА 20-го–НАЧАЛА 21-го вв.

© 2023 г. А. Б. Полонский<sup>а</sup>, \*, А. Н. Серебренников<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБНУ “Институт природно-технических систем”, Севастополь, Россия

\*E-mail: apolonsky5@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

На основании анализа спутниковых данных с 1982 по 2021 гг. с пространственным разрешением около  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  подтверждено общее повышение температуры поверхности Черного моря, составляющее в среднем за год около  $0.6^\circ\text{C}/10$  лет. Ежегодное приращение температуры, обусловленное линейным трендом, максимально в мае–июне. В эти месяцы гидрологической весны скорость роста температуры поверхности моря (ТПМ) примерно в полтора раза больше, чем в октябре–ноябре. На протяжении большей части года общее потепление поверхностного слоя вод не сопровождается значимым увеличением внутримесячной дисперсии ТПМ. Такое увеличение отмечается только в некоторые месяцы переходных сезонов, особенно в период гидрологической весны, когда значительно возрастает абсолютная величина экстремальных термических аномалий и их площадь. Максимальные амплитуды межгодовых вариаций ТПМ приурочены к северо-западной части Черного моря. Существенное влияние на пространственно-временную структуру ТПМ оказывают изменения в полях атмосферного давления и ветра. Долгопериодные тенденции приводного давления над Черным морем указывают на интенсификацию региональной циклонической активности в атмосфере (особенно выраженную с 2009 г.), что приводит к усиленной генерации отрицательных аномалий ТПМ значительной амплитуды. Такие аномалии возникают преимущественно в теплое полугодие (особенно, в мае и октябре) за счет развития апвеллингов ветрового происхождения различных типов. Майские и октябрьские отрицательные аномалии ТПМ из диапазона  $-(6-5)^\circ\text{C}$  характеризуются максимальными площадями. Теплые аномалии также чаще всего регистрируются в мае и (в меньшей степени) в октябре. Они генерируются аномальными потоками тепла на поверхности моря, в том числе, на мелководных участках шельфа и распространяются на открытые участки акватории за счет горизонтальной адвекции преимущественно ветрового происхождения. Описанные закономерности пространственно-временной изменчивости ТПМ и их ее причины иллюстрируются комплексным анализом полей ветра и ТПМ высокого пространственного разрешения в период развития экстремальных термических аномалий.

*Ключевые слова:* спутниковые данные, приповерхностный ветер и его завихренность, внешний тепловой баланс и аномалии температуры поверхности Черного моря

DOI: 10.31857/S0205961423060064, EDN: DGILDM

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что температура поверхности Черного моря (ЧМ) на климатических масштабах подвержена не только интенсивной сезонной изменчивости. В литературе подробно описаны интенсивные квазипериодические межгодовые и междесятилетние вариации температуры поверхности моря (ТПМ) (Изменчивость, 1984; Гидрометеорология, 1991; Овчинников, Попов, 1984; Oguz, Besiktepe, 1999; Stanev, 2005; Shapiro et al., 2010). При этом до последних (приблизительно полутра-двух) десятилетий односторонних долговременных трендов в изменении ТПМ не выделялось (Полонский и др., 2013; Дорофеев, Сухих, 2016). Потепление верхнего слоя

вод ЧМ конца 20-го столетия интерпретировалось как квазипериодический сигнал, поскольку аналогичное повышение ТПМ наблюдалось и в середине века. В работах, опубликованных в последнее время, описано современное повышение ТПМ, которое существенно превышает по величине потепление поверхностных вод ЧМ середины 20-го столетия (Полонский и др., 2013; Miladinova et al., 2017; Bengil, Mavruk, 2018; Sakalli, 2018). Возникает вопрос: как это потепление сказалось на статистических характеристиках ТПМ и ее аномалий в разных частях ЧМ? В настоящей работе этот вопрос рассматривается на основе доступных спутниковых данных с 1982 года. Важность получения значимой оценки характеристик

долговременной изменчивости ТПМ очевидна как с климатической, так и с биологической точек зрения (Salihoglu, 2017). Отметим, что период регулярных спутниковых наблюдений включает в себя и последнее по времени квазипериодическое похолодание поверхностных вод Черного моря второй половины 20-го столетия и современное их потепление.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Для расчета температурных аномалий в работе были проанализированы ежедневные оцифрованные карты температуры поверхности Черного моря с пространственным разрешением около  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  за 14-летний период (с 2008 по 2021 гг.) и карты ТПМ с разрешением  $\sim(0.05^\circ \times 0.05^\circ)$  за 40-летний период (с 1982 по 2021 гг.). Информация заимствовалась с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), на котором выложены два массива с информацией о ТПМ (каждый из них обозначен идентификатором Product ID): SST\_BS\_SST\_L4\_NRT\_OBSERVATIONS\_010\_006 и SST\_BS\_SST\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_010\_022 (CMEMS, 2022). Данные о ТПМ основаны на ночных изображениях, полученных инфракрасными датчиками, установленными на различных спутниковых платформах. Второй из этих массивов позволяет проанализировать ТПМ с точки зрения климатической изменчивости, поскольку он содержит данные, которые накоплены за временной промежуток, превышающий принятый период климатического осреднения (30 лет). Именно поэтому этот массив будет использоваться в настоящей работе в первую очередь.

Точность спутниковой информации о температуре поверхности Черного моря оценивалась путем ее сравнения с данными независимых дрейфтеров за годовой период. Среднее расхождение между этими двумя видами данных и СКО (среднеквадратичное отклонение) для изображений со сверхвысоким разрешением (около  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ ) составляют  $-0.23 \pm 0.07^\circ\text{C}$  и  $0.61 \pm 0.07^\circ\text{C}$  (<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SST-QUID-010-004-006-012-013.pdf>), а для изображений с разрешением ( $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ) соответственно  $0.11 \pm 0.01^\circ\text{C}$  и  $0.50 \pm 0.01^\circ\text{C}$  (<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SST-QUID-010-021-022-041-042.pdf>).

Для анализа причин формирования пространственно-временной изменчивости температурных аномалий верхнего слоя вод в работе использовались следующие массивы:

– векторные данные о приповерхностном ветре (ПВ) CCMR OCW (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind) за 34-летний период (с

1988 по 2021 гг.) с 6-часовым временным интервалом и пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , которые затем усреднялись за сутки. Данные о ветре получены из архива NASA PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) (Remote Sensing Systems, 2022).

– данные ре-анализа ERA5 (Climate Data Store. Copernicus) о приводном давлении и о потоках тепла за 1982–2021 гг. (ERA5, 2022), которые усреднялись по каждому году и в каждом узле регулярной сетки с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ .

Для расчета температурных аномалий использовались массивы как с удаленным, так и не удаленным линейным температурным трендом. Для удаления трендов вычислялись характеристики линейные регрессии для ТПМ с использованием стандартной процедуры минимизации остаточной дисперсии межгодовых изменений ТПМ. Тренд рассчитывался для каждого месяца отдельно.

Для описания реальной межгодовой-десятилетней изменчивости ТПМ использовались аномалии, рассчитанные по данным с не удаленным трендом, которые затем сравнивались с аномалиями, полученными после удаления линейного тренда. Применения такой методики было обусловлено двумя причинами. Первая из них (чисто формальная) связана с хорошо известным фактом о том, что линейный тренд температуры поверхности Черного моря на междесятилетнем масштабе не очень хорошо аппроксимирует долгопериодные изменения температуры. Спутниковые данные в основном относятся к периоду потепления поверхности Черного моря, но частично захватывают и холодный период 1980-х гг., а также замедление роста ТПМ в последние несколько лет. Это подтверждается отсутствием значимого тренда в среднегодовой температуре за период с 2008 по 2021 гг., а также хорошо видно по временному ходу ТПМ. Кроме этого, тренд пространственно-неоднороден. Вторая причина более существенная. Глобальное потепление и его региональные проявления выглядят не просто как повышение средней температуры нижней тропосферы, но и как пространственно-временные изменения в полях давления, ветра, влажности, осадков, потоков тепла и пр. Поэтому однородное по пространству увеличение ТПМ по спутниковым данным не отмечается (а они характеризуются достаточно хорошим пространственно-временным разрешением – см. выше). Сравнение аномалий ТПМ, рассчитанных двумя способами, приведенными выше, а также привлечение данных о других гидрометеорологических характеристиках дает возможность установить основные причины пространственно-временной изменчивости ТПМ на масштабах от нескольких лет до нескольких десятилетий.

Температурные аномалии рассчитывались по данным каждого из 2-х массивов ТПМ по следующему алгоритму. Для каждых суток года и для каждой точки на поверхности моря вычислялась средняя температура за весь доступный период. Затем из ежедневной ТПМ была вычтена ежедневная средняя температура в каждой точке. В результате были получены массивы данных с ежедневной аномалией ТПМ. Кроме этого производился аналогичный расчет термических аномалий после удаления значимого линейного тренда, рассчитанного для каждого месяца в отдельности.

Аномалии ТПМ разбивались на два кластера:

– значения, попадающие в диапазоны положительных аномалий:

2–3°C, 3–4°C, 4–5°C, 5–6°C, >6°C

– значения, попадающие в диапазоны отрицательных аномалий:

–3...–2°C, –4...–3°C, –5...–4°C, –6...–5°C, <–6°C

В итоге были получены карты ежедневных, ежемесячных и годовых аномалий для разных температурных диапазонов и разных пространственных разрешений.

Для дальнейшего статистического анализа строились гистограммы ТПМ, как для всего периода исследования, так и для двух 20-летних временных отрезков. Первый из них покрывал период с 1982 по 2001 гг., а второй – с 2002 по 2021 гг. Гистограммы строились как для каждого месяца, так и для среднегодовых температур.

По полученным данным (для каждого температурного массива) были построены межгодовые изменения суммарной площади поверхности моря, занятой положительными и отрицательными аномалиями температуры, выделены месяцы с максимальными аномалиями, как для всего периода исследования, так и для отдельных лет. Для экстремальных температурных аномалий были построены графики ежедневных изменений площади поверхности с аномальной температурой и проанализированы совместная изменчивость полей аномальной ТПМ и приповерхностного ветра.

Для общей характеристики крупномасштабной структуры поля ТПМ и анализа механизмов генерации ее аномалий выполнялось разложение среднегодовых полей ТПМ и приводного давления на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) по стандартному алгоритму (Jolliffe and Cadima, 2016) и привлекались данные о ежегодных суммарных потоках тепла на поверхности ЧМ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

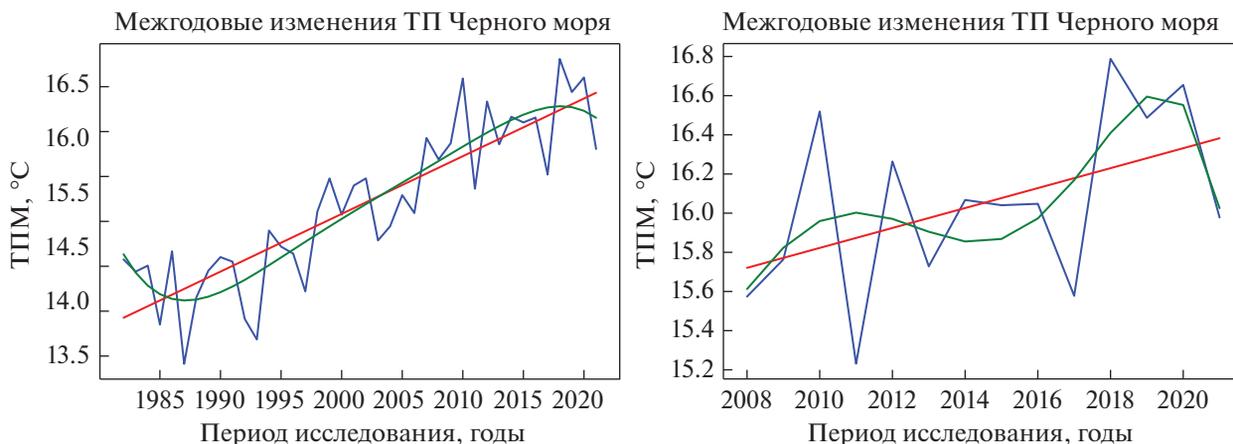
Временной ряд среднегодовой ТПМ, построенный по данным с разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ,

демонстрирует значимое потепление поверхности моря с коэффициентами детерминации для линейной и полиномиальной аппроксимации 5-го порядка 0.64 и 0.74 соответственно (рис. 1, слева). Средняя за 40 лет скорость потепления поверхностного слоя составляет около  $0.6^\circ\text{C}$  за 10 лет, но быстрее всего ТПМ росла между 1987 и 2010 гг. Однако это потепление не было одинаковым в разные месяцы года. Максимальное ежегодное приращение температуры поверхности ЧМ, обусловленное линейным трендом, отмечалось в мае–июне. В эти месяцы гидрологической весны скорость роста ТПМ был примерно в полтора раза больше, чем в октябре–ноябре. Во второй половине гидрологического лета (август–сентябрь) скорость потепления верхнего слоя вод Черного моря также превышала соответствующую скорость, полученную для февраля (в среднем приблизительно на 30%). В результате амплитуда сезонного хода ТПМ в процессе потепления изменилась за 40 лет более чем на  $0.5^\circ\text{C}$  за счет неравномерного прогрева поверхностного слоя вод на протяжении года. При использовании данных с разрешением  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  за период с 2008 по 2021 гг. значимость линейного тренда среднегодовой температуры и коэффициент его детерминации существенно уменьшились (соответственно, до 80% и 0.22) (рис. 1, справа).

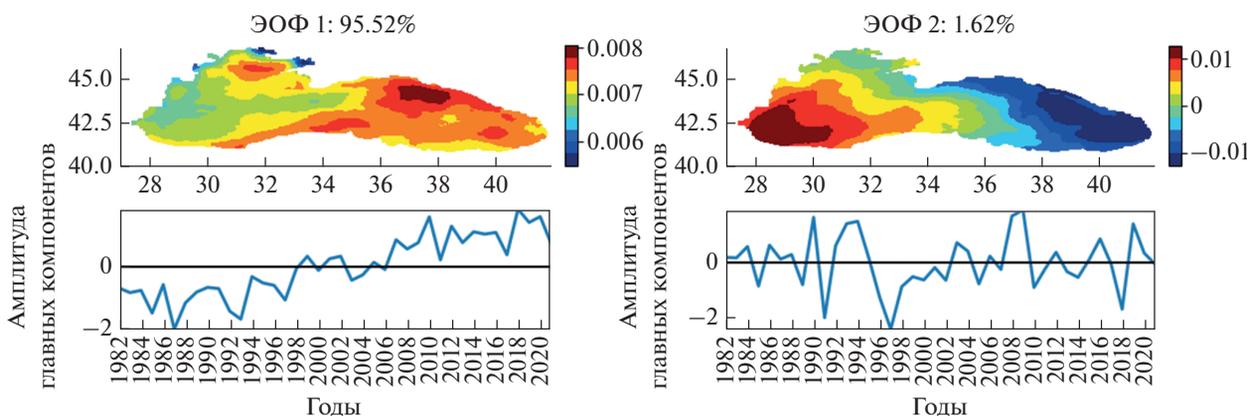
Гистограммы ТПМ, построенные по данным для двух исследованных периодов (1982–2021 гг. и 2008–2021 гг.), характеризуют закон распределения, близкий к нормальному (рис. 4). Причем, при улучшении разрешения (и, соответственно, увеличении количества используемых для статистических оценок данных) степень соответствия гистограммы нормальному закону распределения возрастает в полном согласии с центральной предельной теоремой (Вентцель, 1999; гистограммы, построенные по данным массива с разрешением  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ , не приведены).

Основной вопрос, который будет подробно обсуждаться ниже, сводится к следующему: какова пространственно-временная структура долговременного повышения ТПМ и как связаны с ней характеристики аномалий температуры межгодового масштаба в разные месяцы года.

Первая эмпирическая мода в разложении ежегодной среднегодовой ТПМ, из которой не удалялся линейный тренд (ЭОФ 1), отвечает за 95.5% суммарной дисперсии поля среднегодовой ТПМ (рис. 2, слева). Естественно, что при этом изменчивость временного коэффициента этой моды очень близка к временному ходу среднегодовой температуры поверхностных вод Черного моря (сравните рис. 1, слева и временной коэффициент на рис. 2, слева). Амплитуда вариаций ТПМ, описываемой первой ЭОФ, максимальна в северо-восточной части моря.



**Рис. 1.** Изменения среднегодовой ТПМ с линейным трендом и полиномиальной аппроксимацией пятого порядка, рассчитанными по данным с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  за 40-летний период (слева), с разрешением  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  за 14-летний период (справа).



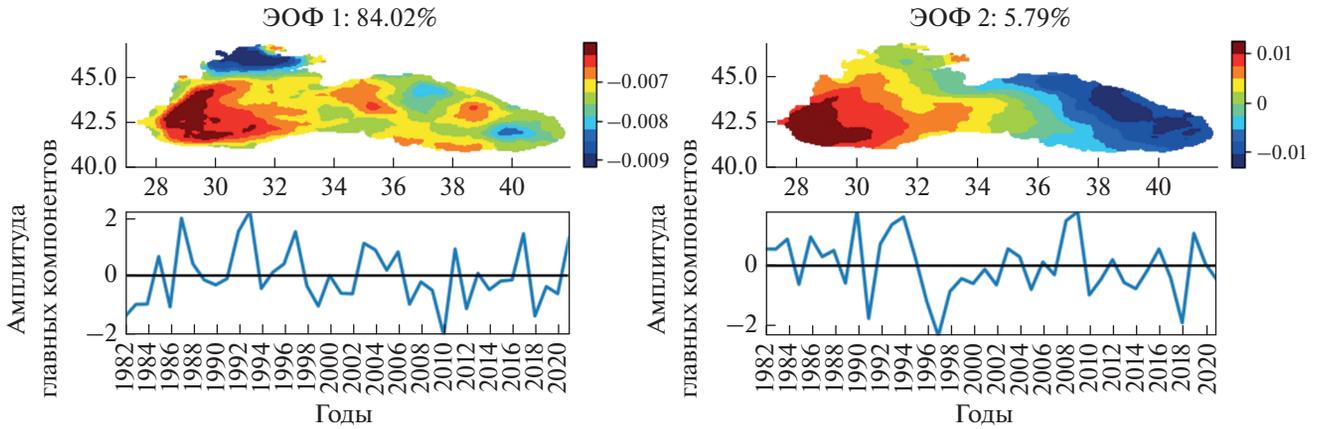
**Рис. 2.** Пространственная структура первой (слева) и второй (справа) ЭОФ ежегодной ТПМ в Черном море и соответствующие временные коэффициенты. Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , тренд не удалялся.

После удаления линейного тренда вклад первой ЭОФ в суммарную дисперсию ТПМ уменьшается почти до 84%, т.е., на 11.5%. При этом происходит существенная трансформация пространственной структуры этой ЭОФ. Максимальная амплитуда межгодовых вариаций первой ЭОФ в этом случае приурочена к северо-западной части ЧМ (рис. 3, слева). Изменение структуры первой ЭОФ после удаления линейного тренда свидетельствует о том, что пространственная изменчивость трендовой и межгодовой составляющих характеризуются разными особенностями.

Если не удалять из анализируемых временных рядов линейный тренд, то вторая ЭОФ отвечает всего лишь за 1.6% суммарной дисперсии поля среднегодовой ТПМ. Ее пространственная структура характеризуется противофазными изменениями ТПМ в западной и восточной частях моря

(рис. 2, справа). После удаления линейного тренда доля второй ЭОФ в общей дисперсии увеличивается до 5.6%. При этом (в отличие от первой эмпирической моды) ее пространственная структура практически не изменяется по сравнению с полем, содержащим линейный тренд (рис. 3, справа).

Внутримесячная дисперсия осредненных по всей акватории моря среднесуточных значений ТПМ максимальна в мае–июне и октябре–ноябре (табл. 1). Подчеркнем, что на протяжении большей части года общее потепление поверхностного слоя вод не сопровождается значимым увеличением внутримесячной дисперсии ТПМ. В некоторые летние и зимние месяцы, напротив, она даже уменьшается. Увеличение дисперсии отмечается в некоторые месяцы переходных сезонов, особенно в период гидрологической весны (табл. 1, рис. 4).



**Рис. 3.** Пространственная структура первой (слева) и второй (справа) ЭОФ ежегодной ТПМ в Черном море и соответствующие временные коэффициенты. Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , тренд удален.

При этом увеличение асимметрии в гистограммах ТПМ при потеплении также в целом не происходит. Единственный месяц, для которого отмечено одновременное увеличение средней ТПМ, ее внутримесячной дисперсии и абсолютной величины асимметрии — это апрель. Таким образом, в летние и зимние месяцы не следует ожидать увеличения повторяемости экстремальных аномалий ТПМ, в отличие от весеннего и осеннего сезонов. Отмеченная закономерность не типична для температуры воздуха и климатического периода, характеризующегося повышением температуры (IPCC, 2012). Это объясняется тем обстоятельством, что атмосфера в основном нагревается снизу, а океан сверху. Поэтому при потеплении атмосферы (особенно выраженном в нижней тропосфере) она в целом становится более конвективно-неустойчивой, тогда как вертикальная стратификация океана при потеплении верхнего перемешанного слоя, напротив, обостряется. Если основываться на результатах ранее выполненных работ, то вероятно некоторое увеличение величины экстремальных отрицательных аномалий ТПМ, обусловленных ветровыми апвеллингами в весенний период, когда толщина прогретого верхнего перемешанного слоя невелика и повторяемость апвеллингов максимальна (Полонский, Музылева, 2016; Полонский, Дробосюк, 2018).

Естественно, что, если не удалять из анализируемых рядов линейный тренд перед расчетом аномалий, то общее потепление поверхностного слоя вод Черного моря приводит к увеличению величины положительных аномалий и площади поверхности, занятой аномально теплыми водами. По этой же причине в целом уменьшаются абсолютные величины отрицательных аномалий и площадь акватории с аномально холодными водами. Действительно, межгодовые изменения суммарной площади поверхности моря, на которой от-

мечаются положительные и отрицательные аномалии ТПМ различной величины, рассчитанные без предварительного удаления тренда (рис. 5, 6), указывают на интенсификацию и большую пространственную протяженность положительных аномалий ТПМ одновременно с ослаблением и уменьшением площади отрицательных аномалий. Этот (достаточно тривиальный) результат важен с прикладной точки зрения. Он демонстрирует реальное изменение термического режима поверхностного слоя вод ЧМ за последние десятилетия, вызванное монотонным увеличением ТПМ, связанным с общим потеплением.

Общее долговременное повышение ТПМ в основном обусловлено увеличением притока тепла на поверхности моря. Если оценить потепление верхнего перемешанного 20-метрового слоя моря с начала 1990-х гг. за счет этого механизма (рис. 7), то с использованием одномерного уравнения баланса тепла можно получить увеличения температуры приблизительно на  $2.25^\circ\text{C}/30$  лет. Эта оценка близка к наблюдаемому тренду среднегодовой ТПМ (рис. 1) и отвечает потеплению верхнего перемешанного слоя средне-климатической толщины. Конечно, полученная оценка очень приблизительна, т.к. она основывается на довольно грубом расчете внешнего теплового баланса ЧМ, представляющего собой малую разность больших чисел. Кроме этого, некоторый (не пренебрежимо малый) вклад в тренды ТПМ в Черном море могут вносить изменяющиеся притоки речных вод с разной температурой (Полонский, Воскресенская, 2003). Тем не менее, отмеченное выше совпадение полученной оценки с наблюдаемым трендом симптоматично.

Для оценки характеристик теплых и холодных аномалий без учета регионального повышения температуры, связанного с глобальным потеплением,

**Таблица 1.** Среднемесячная ТПМ, осредненная по всей акватории Черного моря, медиана, внутримесячная дисперсия и асимметрия, рассчитанные по данным с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  за (1982–2001)/(2002–2021) гг. (в числителе/знаменателе, соответственно). Жирным выделены средние статистические характеристики в те месяцы, гистограммы ТПМ для которых приведены на рис. 4. Подчеркнуты рассчитанные параметры для апреля (единственного месяца, в котором произошло увеличение ТПМ, ее внутримесячной дисперсии и абсолютной величины асимметрии)

№ месяца	Средняя (град)	Медиана (град)	Дисперсия (град) <sup>2</sup>	Асимметрия
1	7.79/8.77	7.79/8.73	0.26/0.25	0.13/0.37
2	6.62/7.68	6.59/7.67	0.03/0.03	0.80/0.12
3	6.77/7.88	6.64/7.86	0.06/0.06	1.06/0.47
<u>4</u>	<u>9.09/10.09</u>	<u>9.07/9.98</u>	<u>1.05/1.34</u>	<u>0.27/0.45</u>
<b>5</b>	<b>14.06/15.88</b>	<b>14.09/15.85</b>	<b>3.54/3.65</b>	<b>–0.02/0.02</b>
6	19.88/21.78	20.38/22.09	1.84/2.37	–0.56/–0.38
<b>7</b>	<b>23.33/24.86</b>	<b>23.48/24.86</b>	<b>0.39/0.39</b>	<b>–0.34/–0.09</b>
8	24.22/25.73	24.31/25.82	0.08/0.09	–1.27/–0.92
9	21.64/22.98	21.67/23.00	0.96/1.26	0.11/0.02
<b>10</b>	<b>17.75/18.71</b>	<b>17.91/18.60</b>	<b>1.73/1.64</b>	<b>–0.24/0.13</b>
11	13.29/14.55	13.16/14.52	1.51/1.14	0.13/0.06
<b>12</b>	<b>9.77/11.16</b>	<b>9.65/11.09</b>	<b>0.62/0.85</b>	<b>0.29/0.08</b>

рассмотрим данные с разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  и с удаленным линейным трендом.

Из графиков межгодовых изменений суммарной площади поверхности моря, на которой отмечаются положительные аномалии ТПМ (рис. 8), видно, что максимальные отклонения от средней ТПМ наблюдались в 2012 и 2018 гг. Это соответствует результатам, полученным по данным о ТПМ с тем же разрешением, но не удаленным трендом (рис. 6, правый). Из рис. 9, на котором показаны изменения суммарной ежемесячной площади положительных аномалий ТПМ, видно, что максимальные положительные аномалии (от 5 до 9°C) отмечались в мае. При этом суммарная площадь покрытия поверхности моря положительной аномалией такого типа превысила 500000 км<sup>2</sup>.

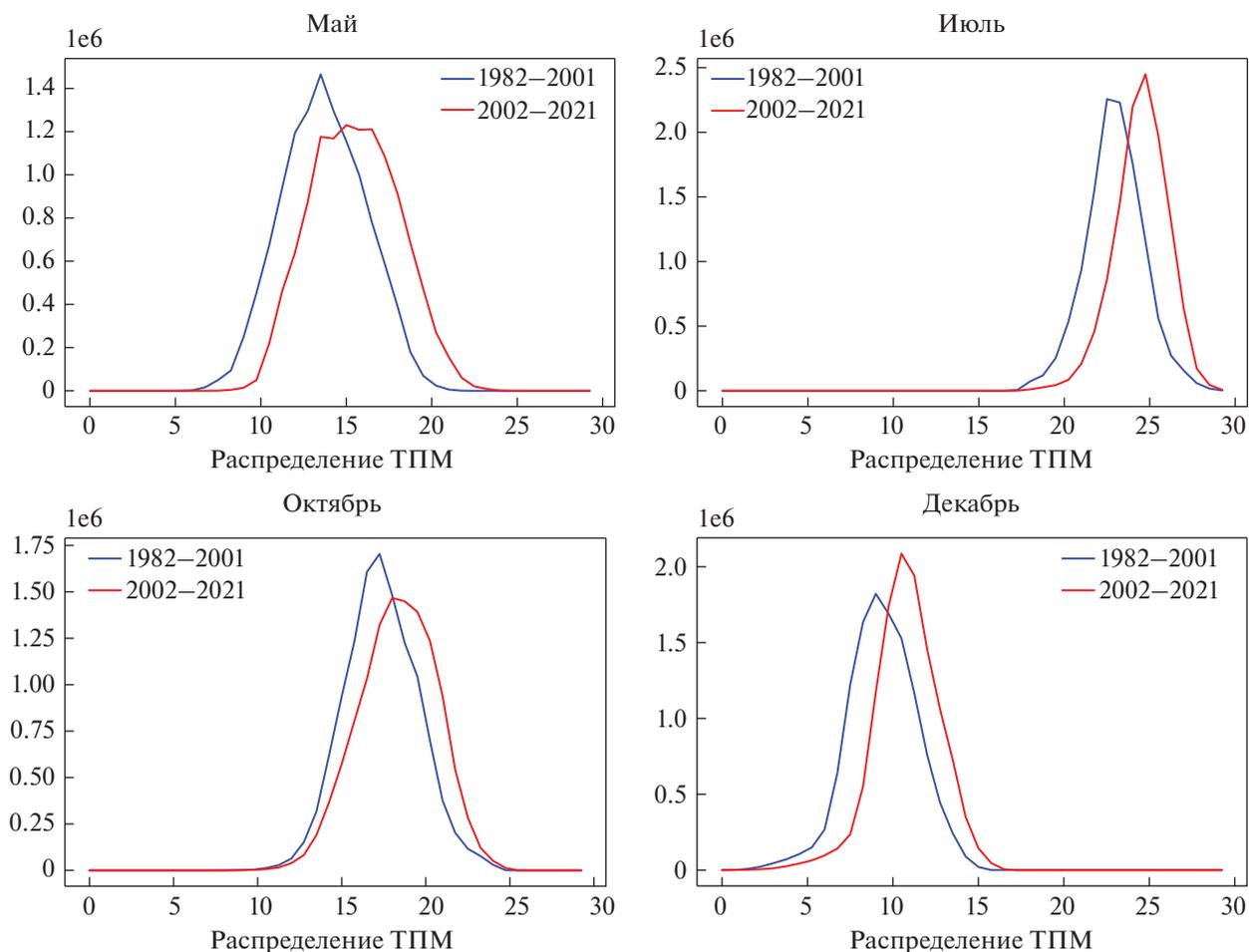
Самые экстремальные и обширные теплые аномалии наблюдались в северо-западной части моря в мае 2012. Второй период повышенной повторяемости экстремальных и обширных теплых аномалий поверхностного слоя вод приурочен к октябрю (хотя они меньше по абсолютной величине и занимают примерно вдвое меньшую площадь поверхности моря, чем в мае, сравните рис. 8 и 9).

Таким образом, подтверждается вывод, сделанный выше при анализе гистограмм ТПМ и заключающийся в том, что повышенную повторяемость экстремальных аномалий ТПМ следует ожидать в переходные сезоны второго (более теплого) двадцатилетнего периода, начинающегося с 2002 г., а, особенно, весной. Как показано в работе (Полонский, Серебренников, 2023б), типичная

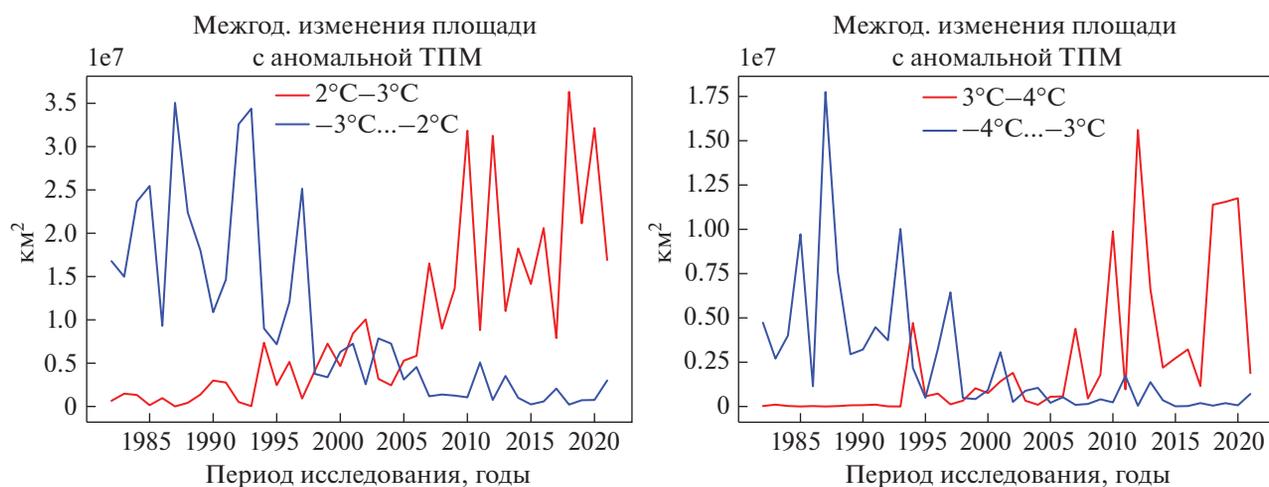
повторяемость подобных аномалий составляет в настоящее время порядка одного случая в несколько лет. Они генерируются аномальными потоками тепла на поверхности моря (в том числе, на мелководных участках шельфа, где в их формировании могут принимать участие и аномально теплые речные воды), и распространяются на открытые участки акватории за счет горизонтальной адвекции преимущественно ветрового происхождения.

Подчеркнем, что увеличивается повторяемость и площадь именно экстремальных положительных аномалий ТПМ (превышающих 5–6°C), возникающих в весенний период. Что касается аномалий ТПМ из диапазона 2–4°C то это увеличение незначимо (рис. 8).

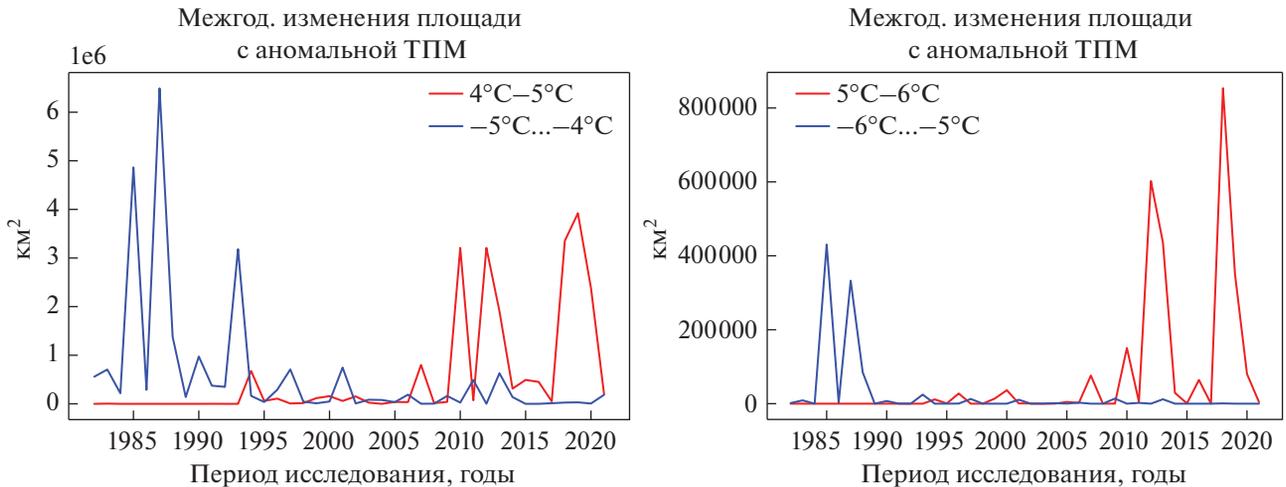
Характеристики отрицательных аномалий ТПМ, рассчитанных после удаления линейного тренда, также рассмотрим вначале по данным за 1982–2021 гг. с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . Из рис. 10 хорошо видны высокоамплитудные межгодовые вариации площади поверхности моря, занятой отрицательными аномалиями ТПМ различной величины. В отдельные годы их площадь увеличивается по сравнению с годами с низкими значениями этого показателя в несколько раз. Для аномалий ТПМ из диапазона от –2 до –3°C выделяются максимумы площадей в 1987, 1993 и 1997 гг., а для максимальных (по абсолютной величине) аномалий ТПМ – 2011 и 2013 гг. Рисунок 11 показывает, что максимальные площади отрицательных аномалий ТПМ отмечаются в мае–июне (в диапазоне –4...–3°C) и в мае и октябре (в диапазоне –6...–5°C).



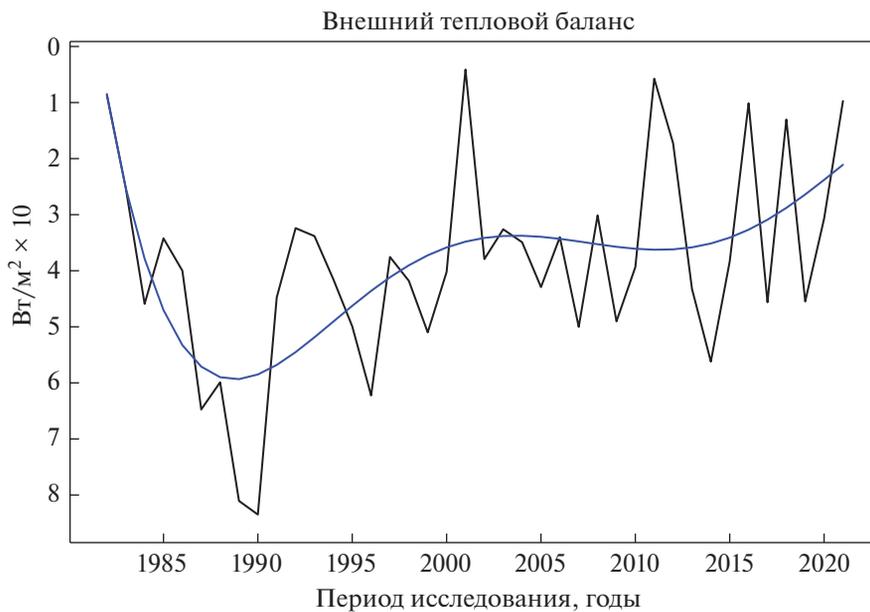
**Рис. 4.** Выборочные гистограммы ТПМ для всего бассейна Черного моря и двух периодов (1982–2001 гг., и 2002–2021). Приведены гистограммы для мая, июля, октября и декабря. Пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ .



**Рис. 5.** Межгодовые изменения суммарной ежегодной площади поверхности Черного моря, на которой отмечались положительные аномалии ТПМ в диапазонах 2–3°C (слева) и 3–4°C (справа, показано красным цветом), и отрицательные аномалии ТПМ в диапазонах –(3–2)°С и –(4–3)°С (показано синим цветом). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . При расчете аномалий ТПМ тренд не удалялся.



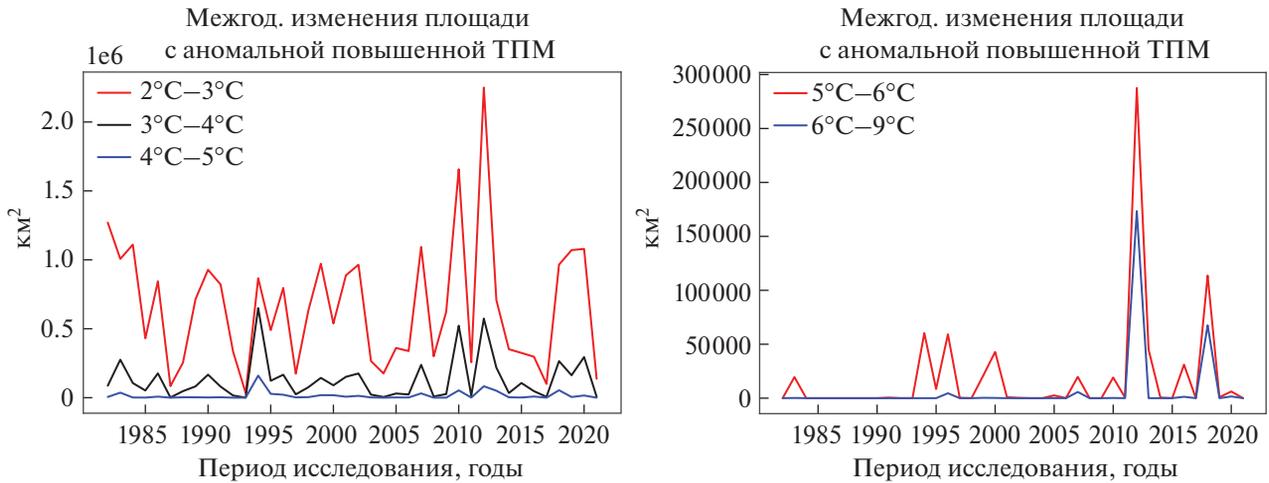
**Рис. 6.** Межгодовые изменения суммарной площади поверхности Черного моря, на которой отмечались положительные температурные аномалии в диапазонах 4–5°C (слева) и 5–6°C (справа, показано красным цветом), и отрицательные аномалии в диапазонах –(5–4)°C и –(6–5)°C (показано синим цветом). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных 0.05° × 0.05°. При расчете аномалий ТПМ тренд не удалялся.



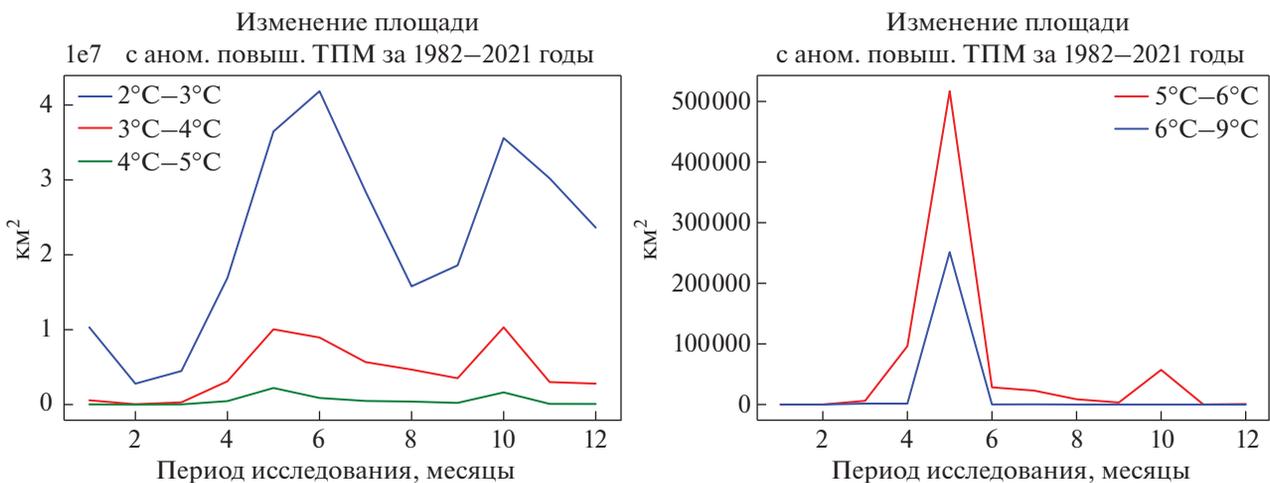
**Рис. 7.** Ежегодные суммарные притоки тепла (внешний тепловой баланс) на поверхности Черного моря, рассчитанны по данным ре-анализа ERA-5. Синей линией показан аппроксимирующий полином 5-го порядка.

Подчеркнем, что аномалии ТПМ из диапазона –(6–5)°C до 2000 г. вообще не выделялись. Начиная с 2001 г., они и стали регулярно возникать с периодичностью, не превышающей 2–3 г. При этом площадь поверхности моря, занятой экстремально холодными водами в целом возрастает со временем (рис. 10). Эти результаты подтверждают увеличение повторяемости экстремальных аномалий ТПМ в переходные сезоны при общем потеплении поверхностного слоя вод ЧМ (см. выше) и

преимущественно апвеллинговое происхождение отрицательных аномалий ТПМ (Полонский, Серебренников, 2023а). Вместе с тем, максимальная пространственная протяженность экстремальных отрицательных аномалий ТПМ отмечается не в весенний период (как можно было ожидать, исходя из опубликованных данных, см. выше), а в осенний (рис. 11). Это свидетельствует об изменении пространственно-временной структуры поля ветра над ЧМ, вызывающего понижение ТПМ



**Рис. 8.** Межгодовые изменения суммарной площади поверхности Черного моря, на которой отмечались положительные температурные аномалии в диапазонах 2–3°C, 3–4°C, 4–5°C (слева) и 5–6°C, 6–9°C (справа). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . Перед расчетом аномалий ТПМ линейный тренд удален.



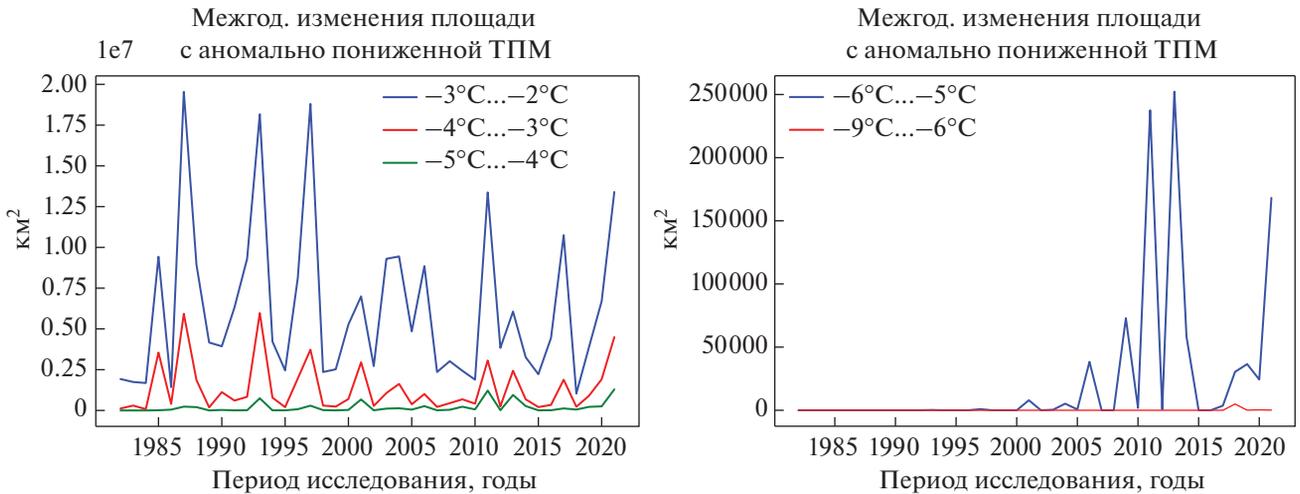
**Рис. 9.** Изменения суммарной среднемесячной площади положительных температурных аномалий в поверхностном слое Черного моря в диапазонах 2–3°C, 3–4°C, 4–5°C (слева) и 5–6°C и 6–9°C (справа). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . Перед расчетом аномалий ТПМ тренд удален.

апвеллингового происхождения, что подтверждается результатами соответствующего анализа, приведенными ниже.

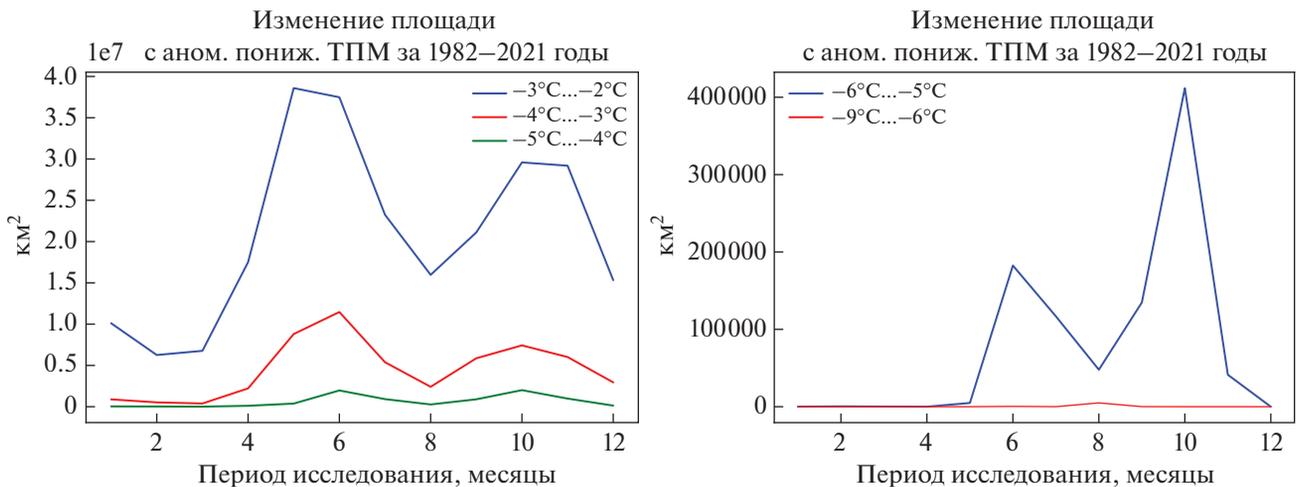
Спутниковые данные за период 2008–2021 гг. с разрешением  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  в целом подтверждают описанный выше результат. Естественно, улучшение пространственного разрешения приводит к тому, что удается выделить более интенсивные экстремальные аномалии ТПМ, чем по данным с худшим разрешением (рисунок не приведен). Причина такого результата очевидна. Максимальные (по абсолютной величине) отрицательные аномалии ТПМ обычно регистрируются в узкой прибрежной зоне (в силу апвеллингового

происхождения этих аномалий) и их величина уменьшается при увеличении пространственного усреднения (Полонский, Дробосюк, 2018).

Таким образом можно отметить, что (также как и для положительных аномалий ТПМ) отмечается тенденция увеличения повторяемости и площади экстремальных отрицательных аномалий, превышающих (по абсолютной величине)  $-(5-6)^\circ\text{C}$ . При этом отрицательные аномалии ТПМ из диапазона  $-(2-4)^\circ\text{C}$  характеризуются противоположной тенденцией, что подтверждает опубликованные ранее результаты (Полонский, Музылева, 2016).



**Рис. 10.** Межгодовые изменения ежегодной суммарной площади поверхности Черного моря, на которой отмечались отрицательные температурные аномалии в диапазонах  $-(3-2)^{\circ}\text{C}$ ,  $-(4-3)^{\circ}\text{C}$ ,  $-(5-4)^{\circ}\text{C}$  (слева) и  $-(6-5)^{\circ}\text{C}$ ,  $-(9-6)^{\circ}\text{C}$  (справа). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ . Перед расчетом аномалий ТПМ тренд удален.

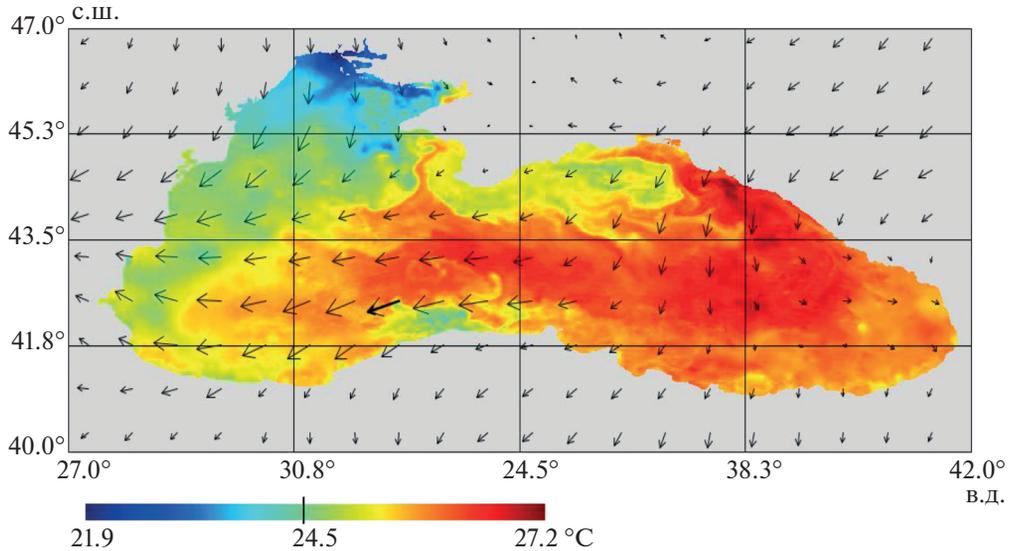


**Рис. 11.** Изменения суммарной среднемесячной площади отрицательных температурных аномалий в Черном море в диапазонах  $-3...-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-4...-3^{\circ}\text{C}$ ,  $-5...-4^{\circ}\text{C}$  (слева) и  $-6...-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-9...-6^{\circ}\text{C}$  (справа). Период исследования 1982–2021 гг., пространственное разрешение данных  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ . Перед расчетом аномалий ТПМ тренд удален.

Пример зарождения отрицательной аномалии ТПМ в прибрежной части акватории за счет ветрового сгона представлен на рис. 12. Хорошо видно, что 27 августа 2013 г. в северной части Черного моря минимальная ТПМ составляла  $21.9^{\circ}\text{C}$ . Причем понижение ТПМ было приурочено к прибрежной зоне и генерировалось ветровым сгоном. К 29 августа минимальная ТПМ опустилась до  $14^{\circ}\text{C}$  и за счет горизонтальной адвекции ветрового происхождения холодные воды распространились на северо-западную и центральную части бассейна. При этом площадь поверхности моря, покрытой аномально холодными водами с темпе-

ратурой ниже средней на  $5-6^{\circ}\text{C}$  и более доходила до 120 000 кв. км (рис. не приведен).

Второй основной причиной появления отрицательных аномалий ТПМ (кроме прибрежного апвеллинга) является подъем подповерхностных и промежуточных вод, обусловленный циклонической завихренностью приводного поля ветра при достаточной глубине моря, а также силе и продолжительности действия ветра. Для 2011 г. этот процесс был подробно проанализирован в работе (Полонский, Серебренников, 2023а). В поле ветра наблюдалась интенсивная циклоническая завихренность, генерирующая восходя-



**Рис. 12.** Пример генерации прибрежного апвеллинга ветровым сгоном. Показаны ТПМ (разными цветами) и векторы приводного ветра (стрелками) 27 августа 2013 г. Разрешение по пространству:  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  (для ТПМ) и  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (для ветра).

щие движения вод и приводящая к выхолаживанию поверхностных вод. При медленно движущихся циклонах этот механизм является эффективным источником формирования отрицательных аномалий ТПМ (Полонский, Дробосюк, 2018).

Для обобщенной характеристики влияния этого механизма на изменения ТПМ обратимся к рис. 2, 3 и 13. На последнем из них хорошо видно, что с 1982 по 1994 гг. в среднегодовом поле приземного давления преобладала антициклоническая компонента, а после 1994 г., а, особенно, начиная с 2009 – циклоническая. Вероятнее всего, это является следствием усиления циклонической завихренности поля ветра над Черным морем, приводящей к выхолаживанию верхнего слоя вод за счет механизмов, проанализированных выше. Такой вывод подтверждается результатами нескольких работ, в которых отмечается увеличение количества циклонов и общая интенсификация циклонической завихренности над Черным морем, начиная с 1980-х гг. (см., например, Maslova et al., 2020). Причем максимальные амплитуды вариаций поля приводного давления отмечаются в западной части Черного моря.

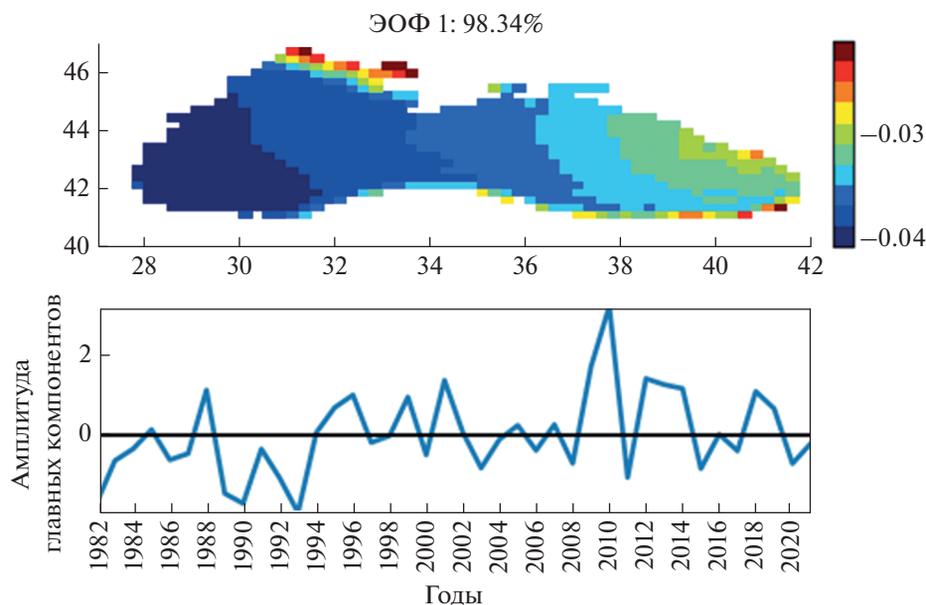
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании спутниковых данных с 1982 по 2021 гг. с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  подтверждено общее повышение температуры поверхности ЧМ, составляющее в среднем за год около  $2.5^\circ\text{C}/40$  лет. Максимальное ежегодное приращение ТПМ, обусловленное линейным трендом, отмечается в мае–июне. В эти

месяцы гидрологической весны скорость роста ТПМ примерно в полтора раза больше, чем в октябре–ноябре. Общее потепление поверхностного слоя вод наиболее выражено в северо-восточной части ЧМ.

Гистограммы ТПМ, построенные по данным с разным пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  и  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ , характерны для выборки из генеральной совокупности, подчиняющейся нормальному закону распределения. Причем, при улучшении разрешения (и, соответственно, увеличении количества используемых для статистических оценок данных) степень соответствия гистограммы нормальному закону возрастает. На протяжении большей части года общее потепление поверхностного слоя вод не сопровождается значимым увеличением внутримесячной дисперсии ТПМ. Такое увеличение отмечается только в некоторые месяцы переходных сезонов, особенно в период гидрологической весны, когда значительно возрастает абсолютная величина экстремальных термических аномалий и их площадь. Максимальные амплитуды межгодовых вариаций ТПМ приурочены к северо-западной части ЧМ.

Существенное влияние на пространственно-временную структуру ТПМ оказывают изменения в полях атмосферного давления и ветра. Долгопериодные тенденции приводного давления над ЧМ указывают на интенсификацию региональной циклонической активности в атмосфере, что приводит к усиленной генерации отрицательных аномалий ТПМ. Протяженные холодные аномалии значительной амплитуды возникают преимущественно в теплое полугодие (особенно,



**Рис. 13.** Пространственная структура первой ЭОФ ежегодного приводного давления над Черным морем (сверху) и соответствующий временной коэффициент (снизу), рассчитанный по данным ре-анализа ERA5.

в мае и октябре) за счет развития апвеллингов ветрового происхождения различных типов. Майские и октябрьские отрицательные аномалии ТПМ из диапазона  $-(6-5)^{\circ}\text{C}$  характеризуются максимальными площадями. Теплые аномалии также чаще всего регистрируются в мае и (в меньшей степени) в октябре. Они генерируются аномальными потоками тепла на поверхности моря (в том числе, на мелководных участках шельфа, где в их формировании могут принимать участие и аномально теплые речные воды), и распространяются на открытые участки акватории за счет горизонтальной адвекции преимущественно ветрового происхождения.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность анонимному рецензенту, чьи критические замечания способствовали конструктивной доработке статьи.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы гос. задания «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов (гос. рег. № 121122300074-7)».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов // М.: Высш. шк. 1999. 576 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Справочник. // СПб.: Гидрометеиздат. 1991. 430 с.

Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 г. на основе результатов выполненного реанализа // Морской гидрофизический журн. 2016. № 1(187). С. 33–48.  
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-33-48>

Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Под ред. Б.А. Нелепо. // Л.: Гидрометеиздат. 1984. 240 с.

Овчинников И.М., Попов Ю.И. К вопросу о формировании холодного промежуточного слоя в Черном море // ДАН СССР. 1984. Т. 279. № 4. С. 986–989.

Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н. О причинах понижения температуры в Черном море // Докл. НАН Украины. 2003. № 12. С. 108–111.

Полонский А.Б., Дробосюк Н.С. О резких понижениях температуры поверхности Черного моря по данным многолетних спутниковых наблюдений // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 13(33). С. 42–49.  
<https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-3-42-49>

Полонский А.Б., Музылева М.А. Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Известия РАН. Серия географическая. Вып. 4. 2016. С. 96–108.

Полонский А.Б., Серебрянников А.Н. О механизме резкого понижения температуры поверхности в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Метеорология и гидрология. 2023а. № 2. С. 31–40.  
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-31-40>

- Полонский А.Б., Серебрянников А.Н. О положительных аномалиях температуры поверхности моря в северной части Черного моря и у юго-западного побережья Крыма // Метеорология и гидрология. 2023б (в печати).
- Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Белокопытов В.Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солёности в Черном море // Морской гидрофизический журн. 2013. № 6. С. 27–41.
- Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Чёрного моря // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195–207.  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>
- Bengil F., Mavruk S. Warming in Turkish Seas: Comparative Multidecadal Assessment // Turkish J. Fisheries and Aquatic Sciences. 2018. № 19(1). P. 51–57.  
[https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19\\_01\\_06](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_01_06)
- СМЕМС. URL: <https://www.copernicus.eu> (date of access: 20.12.2022).
- ERA5. Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp> (date of access: 20.12.2022).
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012, 582 p.
- Jacox M.G., Alexander M.A., Amaya D., et al. Global seasonal forecasts of marine heat-waves // Nature. 2022. V. 604. P. 486–490.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04573-9>
- Jolliffe I.T., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments // Phil. Trans. R. Soc. 2016. 374: 20150202.  
<https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Lima L., Ciliberti S.A., Aydogdu A. et al. Climate Signals in the Black Sea from a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis // Front. Mar. Sci. 2021. 8:710973.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
- Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. et al. Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability. 2020. 12 (11). 4468.  
<https://doi.org/10.3390/su12114468>
- Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriç E., and Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. № 122(7). P. 5624–5644.  
<https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
- Remote Sensing Systems. URL: <https://www.remss.com> (date of access: 20.12.2022).
- Oguz T., Besiktepe S. Observations on the Rim Current Structure, CIW Formation, and Transport in the Western Black Sea // Deep-Sea Research. 1999. V. 1. № 46. P. 1733–1753.  
[https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
- Sakalli A., Basusta N. Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // Int. J. Climatol. 2018. V. 38. P. 4687–4698.  
<https://doi.org/10.1002/joc.5688>
- Salihoglu B., Arkin S.S., Akoglu E., Fach B.A. Evolution of Future Black Sea Fish Stocks under Changing Environmental and Climatic Conditions // Front. Mar. Sci. 2017. 4: 339.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00339>
- Shapiro G.I., Aleynik D.L. and Mee L.D. Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea // Ocean Sci. 2010. № 6. P. 491–501.  
<https://doi.org/10.5194/os-6-491-2010>
- Stanev E.V. Understanding Black-Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // Oceanography. 2005. V. 18. № 2. P. 56–75.  
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>

## Changes in the Nature of Temperature Anomalies of the Black Sea Surface During the Warming Period of the Late 20<sup>th</sup>–Early 21<sup>st</sup> Centuries

A. B. Polonsky<sup>1</sup> and A. N. Serebrennikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

Based on the analysis of satellite data from 1982 to 2021 with a spatial resolution of about  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , the total increase in the Black Sea surface temperature was confirmed. Annual temperature averaged over the entire Black Sea rises with the rate of about  $0.6^\circ\text{C}/10$  years. The annual temperature increment due to the linear trend is at a maximum in May–June. In these months of the hydrological spring, the rate of increase in sea surface temperature (SST) is about one and a half times greater than in October–November. For most of the year, the general warming of the surface water layer is not accompanied by a significant increase in the intra-monthly SST variance. Such an increase is observed only in some months of the transition seasons, especially during the hydrological spring, when the absolute magnitude of extreme thermal anomalies and their area significantly increases. The maximum amplitudes of interannual variations of SST are confined to the north-western part of the Black Sea. Changes in atmospheric pressure and wind fields significantly impact on the spatiotemporal SST structure of the. Long-term trends of driving pressure above the Black Sea indicate an intensification of regional cyclonic activity in the atmosphere (especially pronounced since 2009), which leads to increased generation of the negative SST anomalies of significant amplitude. Such anomalies occur mainly in the warm half-year (especially in May and October) due to the development of wind-driven upwell-

ing. The May and October negative SST anomalies from the range of  $-(6-5)^{\circ}\text{C}$  are characterized by maximum areas. Warm anomalies are also most often recorded in May and (to a lesser extent) in October. They are generated by abnormal heat fluxes on the sea surface, including in shallow areas of the shelf and spread to open areas of the Black Sea due to horizontal advection of mainly wind origin. The described patterns of spatio-temporal SST variability and their causes are illustrated by a case-study of extreme thermal anomalies using comprehensive analysis of wind and SST fields of high spatial resolution.

*Keywords:* satellite data, near-surface wind and its vorticity, heat gain and temperature anomalies of the Black Sea surface

## REFERENCES

- Bengil F., Mavruk S.* Warming in Turkish Seas: Comparative Multidecadal Assessment // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2018. № 19(1). P. 51–57. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19\\_01\\_06](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_01_06)
- CMEMS. URL: <https://www.copernicus.eu> (date of access: 20.12.2022).
- Dorofeev V.L., Sukhikh L.I.* Analiz izmenchivosti gidrofizicheskikh poley Chernogo morya v period 1993–2012 godov na osnove rezul'tatov vypolnennogo reanaliza [Analysis of the variability of the hydrophysical fields of the Black Sea in the period 1993–2012 based on the results of the performed reanalysis] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2016. № 1(187). P. 33–48. (In Russian). <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-33-48>
- ERA5. Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp> (date of access: 20.12.2022).
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. T. 4. Chernoe more. Vyp. 1. Gidrometeoro-logicheskie usloviya. Spravochnik [Hydrometeorological conditions. Directory] // SPb.: Gidrometeoizdat. 1991. 430 p. (In Russian). *Izmenchivost' gidrofizicheskikh poley Chernogo morya*. Pod red. *B.A. Nelepo*. [Variability of hydrophysical fields of the Black Sea. Ed. *B.A. Nelepo*] // L.: Gidrometeoizdat. 1984. 240 p. (In Russian).
- Jacox M.G., Alexander M.A., Amaya D. et al.* Global seasonal forecasts of marine heat-waves // *Nature*. 2022. V. 604. P. 486–490. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04573-9>
- Jolliffe I.T., Cadima J.* Principal component analysis: a review and recent developments // *Phil. Trans. R. Soc.* 2016. 374: 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Lima L., Ciliberti S.A., Aydogdu A. et al.* Climate Signals in the Black Sea from a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis // *Front. Mar. Sci.* 2021. 8: 710973. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
- Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. et al.* Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // *Sustainability*. 2020. 12(11). 4468. <https://doi.org/10.3390/su12114468>
- Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriiz E., Macias Moy D.* Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. № 122(7). P. 5624–5644. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
- Remote Sensing Systems. URL: <https://www.remss.com> (date of access: 20.12.2022).
- Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current Structure, CIW Formation, and Transport in the Western Black Sea // *Deep-Sea Research*. 1999. V. 1. № 46. P. 1733–1753. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
- Ovchinnikov I.M., Popov YU.I.* K voprosu o formirovani kholodnogo promezhutochnogo sloya v Chernom more [On the issue of the formation of a cold intermediate layer in the Black Sea] // *FEAS SSSR*. 1984. V. 279. № 4. P. 986–989. (In Russian).
- Polonskiy A.B., Drobosyuk N.S.* O rezkikh ponizheniyakh temperatury poverkhnosti Chernogo morya po dannym mnogoletnikh sputnikovykh nablyudeniy [On the sharp drops in the temperature of the Black Sea surface according to the data of long-term satellite observations] // *Sistemy kontrolya okruzhayushey sredy*. 2018. № 13(33). P. 42–49. (In Russian). <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-3-42-49>
- Polonskiy A.B., Muzyleva M.A.* Sovremennay prostranstvenno-vremennaya izmenchivost apwellinga v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya i u poberejya Kryma // *Izv. RANq. Ser. Geographicheskaya*, vyp. 4, 2016. P. 96–108.
- Polonskiy A.B., Serebrennikov A.N.* O mekhanizme rezkogo ponizheniya temperatury po-verkhnosti v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya i u poberezh'ya Kryma [On the mechanism of a sharp decrease in surface temperature in the northwestern part of the Black Sea and near the Crimean coast] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023a. № 2. P. 31–40. (In Russian). <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-31-40>
- Polonskiy A.B., Serebrennikov A.N.* O polozhitel'nykh anomal'yakh temperatury poverkhnosti morya v severnoy chasti Chernogo morya i u yugo-zapadnogo poberezh'ya Kryma [On positive sea surface temperature anomalies in the northern part of the Black Sea and off the southwestern coast of Crimea] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023b (in the press). (In Russian).
- Polonskiy A.B., Shokurova I.G., Belokopytov V.N.* Desyatiletnyaya izmenchivost' temperatury i solenosti v Chernom more [Decadal variability of temperature and salinity in the Black Sea] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2013. № 6. P. 27–41. (In Russian).
- Polonskiy A.B., Voskresenskaya E.N.* O prichinakh ponizheniya temperatury v Chernom more [On the reasons for the decrease in temperature in the Black Sea] // *Doklady NAN Ukrainy*. 2003. № 12. P. 108–111. (In Russian).
- Sakalli A., Basusta N.* Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // *Int. J. Climatol*. 2018.

V. 38. P. 4687–4698.

<https://doi.org/10.1002/joc.5688>

*Salihoglu B., Arkin S.S., Akoglu E., Fach B.A.* Evolution of Future Black Sea Fish Stocks under Changing Environmental and Climatic Conditions // *Front. Mar. Sci.* 2017. 4: 339.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00339>

*Shapiro G.I., Aleynik D.L., Mee L.D.* Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea // *Ocean Sci.* 2010. № 6. P. 491–501.

<https://doi.org/10.5194/os-6-491-2010>

*Stanev E.V.* Understanding Black-Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanography.* 2005. V. 18. № 2. P. 56–75.

<https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>

*Stanichnaya R.R., Stanichnyy S.V.* Apvellingi CHernogo morya [Upwellings of the Black Sea] // *Sovrem. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa.* 2021. V. 18. № 4. P. 195–207. (In Russian).

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>

*Venttsel' E.S.* Teoriya veroyatnostey: Ucheb. dlya vuzov [Probability Theory: A Textbook for Universities] // M.: Vyssh. shk. 1999. 576 p. (In Russian).