

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФРОНТОВ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2020 г. Ю. В. Артамонов<sup>а</sup>\*, Е. А. Скрипалева<sup>а</sup>, Р. В. Колмак<sup>а</sup>, А. В. Федирко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*e-mail: artam-ant@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

На основе современного массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением исследована структура и сезонная изменчивость температурных фронтальных зон и фронтов Черного моря. По распределениям полного градиента температуры выделены следующие фронтальные зоны: Западная, Турецкая прибрежная, Фронтальная зона Анатолийского апвеллинга, Юго-восточная прибрежная, Северо-восточная, Крымская, Керченско-Феодосийская, Фронтальная зона глубоководной части Черного моря. На основе анализа распределений меридионального и зонального градиентов температуры в пределах большинства фронтальных зон были выделены крупномасштабные фронты. Показано, что совместное влияние крупномасштабных процессов (сезонный прогрев и охлаждение вод, их адвекция Основным черноморским течением) и региональных факторов (сток рек, конфигурация береговой линии, ширина шельфа, развитие апвеллингов, формирование прибрежных вихрей) приводит к существенной пространственно-временной изменчивости поля температуры и, как следствие, фронтальных зон и фронтов. Установлено, что период существования большинства фронтов составляет несколько месяцев. В северной части моря фронты усиливаются преимущественно в зимний период за счет усиления контрастов между теплыми водами, переносимыми ОЧТ, и более холодными прибрежными водами. У южных берегов моря фронтальные зоны обостряются в основном в конце весны – летом, в период весеннего половодья, развития Анатолийского апвеллинга и интенсивного прогрева вод в восточной части моря.

*Ключевые слова:* Черное море, спутниковые данные, температура поверхности моря, гидрологический фронт, горизонтальный градиент температуры, сезонная изменчивость, рельеф дна, апвеллинг, Основное черноморское течение

DOI: 10.31857/S0205961420010030

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вышло большое количество публикаций, посвященных исследованию структуры и изменчивости термохалинных полей Черного моря на различных пространственно-временных масштабах (Kazmin, Zatsepin, 2007; Тужилкин, 2008; Ginzburg et al., 2008a; Tuzhilkin, 2008; Иванов, Белокопытов, 2011; Capet et al., 2012; Артамонов и др., 2012). В то же время вопросы, относящиеся к анализу границ между разными гидрологическими структурами, которые проявляются в виде фронтальных разделов, в литературе по-прежнему освещены крайне слабо. В ряде работ отмечается, что фронты в Черном море характеризуются высоким уровнем пространственно-временной изменчивости и прослеживаются в основном на синоптическом масштабе (Гинзбург и др., 1996, 2000; Zatsepin et al., 2003), по результатам других исследований фронты выявлены и на климатическом масштабе (Артамонов и др., 2005; Иванов, Белокопытов, 2011; Казмин, 2016). До настоящего времени отсутствует

общепринятая номенклатура крупномасштабных гидрологических фронтов Черного моря, а закономерности их климатической сезонной изменчивости рассмотрены фрагментарно.

В работе (Бабий и др., 2005) приводятся среднемесячные карты горизонтальных градиентов температуры поверхности моря (ТПМ) по массиву среднемесячных спутниковых данных за период 1986–2002 гг. с пространственным разрешением 18 км, однако с позиции фронтогенеза эти результаты не обсуждаются. В работе (Артамонов и др., 2005) на основе анализа климатических полей меридиональных и зональных градиентов ТПМ, рассчитанных по тому же массиву, были выделены крупномасштабные температурные фронтальные разделы Черного моря, получившие наименования – Северо-западный фронт, Фронт глубоководной части Черного моря, Анатолийский фронт, Северо-восточный фронт, Фронт западного шельфа. Были даны оценки среднемесячной сезонной изменчивости характеристик этих фронтов и показано, что за исключением

Анатолийского фронта, который наиболее развит летом, остальные фронты обостряются преимущественно в осенне-зимний период. В июле–августе наблюдается ослабление фронтальной системы Черного моря.

В более поздних работах, например, в монографии (Иванов, Белокопытов, 2011) упоминается о существовании крупномасштабных температурных фронтов в поверхностном слое над северо-западным шельфом, в восточной части моря и на юге у Анатолийского побережья. При этом отмечается, что они подвержены значительной временной изменчивости, но ее закономерности не рассматриваются. В работе (Казьмин, 2016) по среднемесячным спутниковым данным ТПМ за период 1982–2008 гг. рассмотрены пространственно-устойчивые термические фронтальные зоны Черного моря, образование которых связано с региональными климатическими особенностями. По сгущению изотерм выделены фронтальная зона в северо-западной части моря; меридионально ориентированная фронтальная зона между прогревающейся юго-восточной частью и холодной центральной частью моря, существующая с апреля по август; фронтальная зона вдоль центральной части южного побережья моря, которая наблюдается с сентября по октябрь и севернее  $42^\circ$  с.ш. сливается с северным участком меридиональной фронтальной зоны. Автором подтверждено, что фронтальная зона в северо-западной части моря достигает максимальной интенсивности в зимний период (январь–февраль). Вместе с тем, ранее в работе (Артамонов и др., 2005) было показано, что пространственная структура крупномасштабных фронтальных зон в Черном море неоднородна и в их широких пределах можно выделить несколько фронтальных разделов, особенности сезонной изменчивости которых могут различаться. Так, на распределениях меридиональных градиентов температуры через центральную часть северо-западного шельфа были выделены три фронта, интерпретируемых как отдельные ветви общей Северо-западной фронтальной зоны (СЗФЗ).

Дальнейшее уточнение структуры Северо-западной фронтальной зоны и закономерностей ее климатического сезонного цикла нашло отражение в работе (Артамонов и др., 2017). Авторы использовали более современный массив спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением (среднесуточным по времени и  $0.04^\circ$  по пространству), содержащий временные ряды значений ТПМ за период более 30 лет. Было подтверждено существование отдельных ветвей Северо-западной фронтальной зоны (Прибрежной, Центральной и Южной), описанных ранее в работе (Артамонов и др., 2005). Были выявлены отличия внутригодовой изменчивости интенсивности каждой ветви. Отмечено запаздывание наступ-

ления максимума интенсивности ветвей СЗФЗ в южном направлении примерно на 1–2 месяца – Прибрежная ветвь усиливается в ноябре–январе, Центральная ветвь в январе и Южная ветвь в феврале–марте. Было установлено, что для каждой ветви СЗФЗ характерен свой диапазон глубин, над которыми они располагаются. Авторами были даны оценки связи внутригодовой изменчивости фронтов с особенностями синоптической изменчивости ТПМ в северо-западной части моря. Показано, что фронты обостряются в зимний период, когда отмечается минимальный уровень синоптической изменчивости ТПМ. В конце весны, когда уровень синоптической изменчивости ТПМ резко повышается, интенсивность фронтов ослабевает. Летом, когда поверхностные воды наиболее прогреты и относительно однородны, фронтальная система северо-западного шельфа практически полностью размывается.

Необходимо отметить, что, кроме северо-западного шельфа, климатическая структура и сезонная изменчивость фронтальной системы Черного моря до сих пор подробно не рассматривались. Настоящая работа является продолжением начатых ранее исследований структуры и сезонной изменчивости температурных фронтов Черного моря. На основе современного массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением анализируются фронты и их характеристики на всей акватории моря.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе использованы данные спутниковых измерений ТПМ за период с января 1982 по июнь 2017 гг. из массива *Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis* ([http://marine.copernicus.eu/interactive\\_catalogue](http://marine.copernicus.eu/interactive_catalogue)), полученные с помощью радиометра высокого разрешения *AVHRR Pathfinder Version 5.2 (PFV52)* Национального центра океанографических данных *NOAA*. Используемые регулярные среднесуточные спутниковые данные ТПО высокого разрешения в узлах сетки  $0.04^\circ \times 0.04^\circ$  получены по единой методике для всей акватории моря с помощью современных алгоритмов обработки (Nardelli et al., 2010, 2013). Значения ТПМ осреднялись для каждого месяца каждого года, а затем приводились к климатическому виду путем их осреднения для каждого месяца за весь период. Согласно (Монин, 1999) временной период порядка 30-ти лет является достаточным для получения статистически значимых климатических норм. В результате осреднения за 35 лет синоптические и межгодовые вариации в анализируемых полях практически сглаживались. Далее по среднемесячным климатическим значениям ТПМ рассчитывались величины меридиональных (МГТ) в  $^\circ\text{C}/0.04^\circ \text{ lat}$ , зональных (ЗГТ) в  $^\circ\text{C}/0.04^\circ \text{ lon}$  градиентов и пол-

ного горизонтального градиента (ПГТ). Величины МГТ и ЗГТ рассчитывались между двумя соседними узлами расчетной сетки, при этом длина дуги меридиана на широте Черного моря, соответствующая такому шагу сетки, равна примерно 4.4 км, длина дуги параллели — около 3.15 км, размерность ПГТ составляет °C/5.4 км. В тексте статьи размерность градиентов опускается. Положение фронтальных зон определялось на пространственных распределениях полного горизонтального градиента ТПМ для каждого месяца по его значениям, превышающим в два раза и более среднее значение градиента по всей акватории (ПГТср) для данного месяца. Широтное и долготное положение фронтов определялось по экстремумам МГТ и ЗГТ на меридиональных и зональных профилях согласно методике (Артамонов, Скрипалева, 2005, 2008). Для фильтрации остаточных шумов проводилось пространственное сглаживание профилей МГТ и ЗГТ скользящим фильтром по пяти узлам сетки. Тестовые сглаживания с использованием 3-х и 7-ми точечных фильтров показали, что пятиточечный фильтр оказался наиболее оптимальным, подавляя шум и сохраняя основные особенности распределений градиентов вдоль профилей. Идентификация фронтов проводилась по диапазону температуры, соответствующему данному экстремуму, знаку меридионального (зонального) градиента и широтному (долготному) положению экстремума. Положительное значение МГТ (ЗГТ) показывает повышение температуры в направлении с севера на юг (с запада на восток). При устойчивом проявлении хорошо выраженных экстремумов градиентов ТПМ в пределах фронтальной зоны в течение нескольких месяцев они интерпретировались как фронт. В случае, когда на фоне общего роста абсолютных значений градиентов в области фронтальной зоны одновременно прослеживались несколько экстремумов, фронт выделялся по наиболее интенсивным из них. Под термином “обострение или усиление фронта” подразумевалось увеличение абсолютных значений градиентов, соответствующих этому фронту, независимо от знака градиента.

Для оценки достоверности выявления фронтов в климатических полях ТПМ на внутригодовом масштабе был выполнен анализ соотношения уровней синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости ТПМ. Он показал, что доминирующий вклад в общую дисперсию поля ТПМ вносят климатические внутригодовые (сезонные) вариации. На рис. 1, а, б представлены примеры распределений среднегодовых величин МГТ (МГТср), сезонных (СКОсез), межгодовых (СКОмеж) и синоптических (СКОсин) среднеквадратических отклонений ТПМ в западной (вдоль 30° в.д.) и восточной (вдоль 36° в.д.) частях моря. В районах климатических экстремумов градиентов, соответствующих фронтам, значения внутригодового СКО

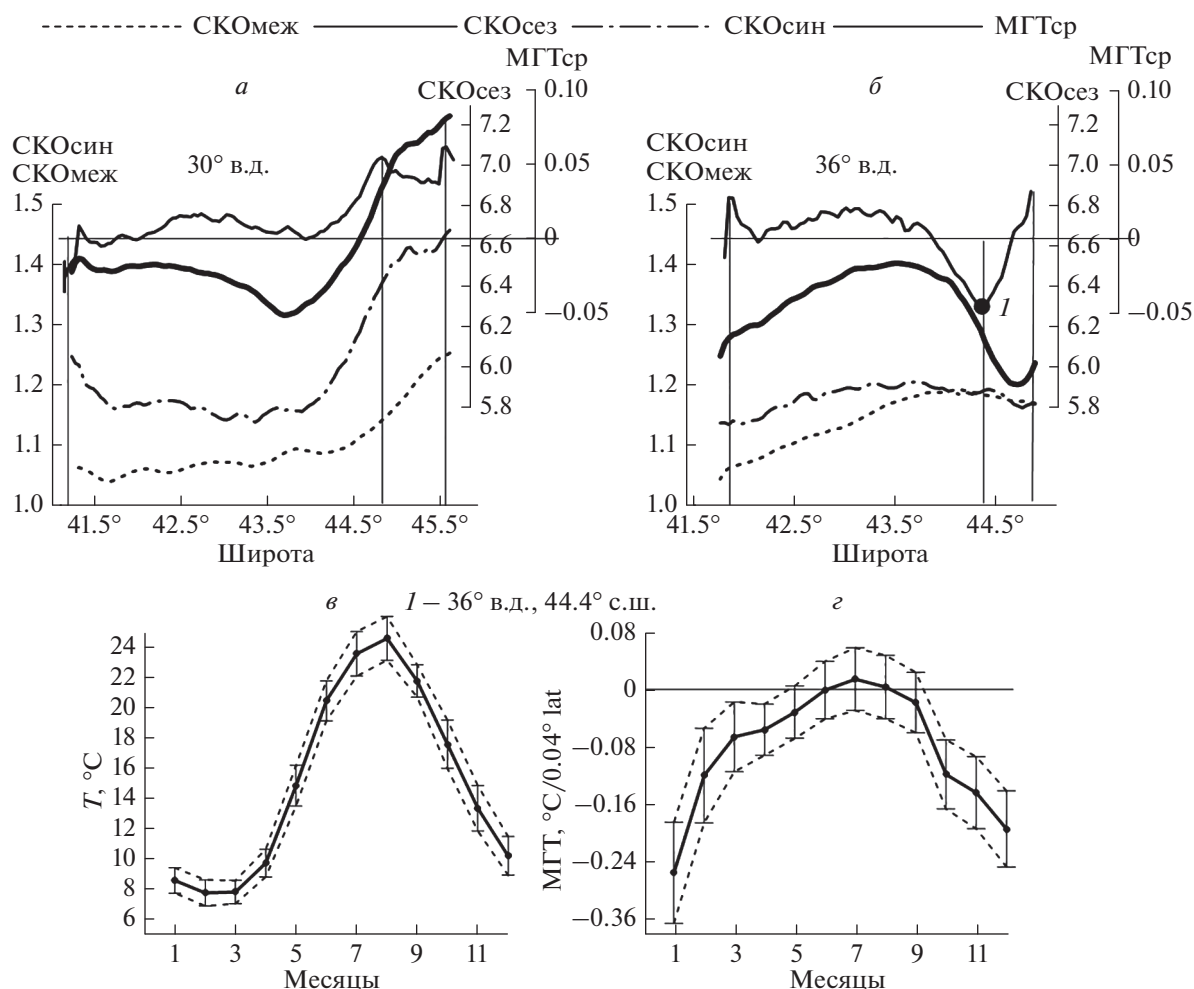
температуры, при которой формируются эти экстремумы, более чем в 5 раз превышают ее межгодовое и синоптическое СКО. Это соотношение сохраняется для районов как повышенного (рис. 1, а), так и пониженного (рис. 1, б) уровня сезонной изменчивости ТПМ. Оценки внутригодового распределения среднемесячных величин экстремумов градиентов и соответствующей им температуры и среднемесячных значений синоптических СКО этих параметров показали, что, несмотря на некоторое повышение синоптической изменчивости градиентов в период усиления фронтов, амплитуды сезонных сигналов ТПМ (рис. 1, в) и величин градиентов (рис. 1, г) на оси фронтов превышают амплитуды сезонных сигналов ТПМ и величин градиентов на оси фронтов превышают максимальную величину синоптических СКО ТПМ (в 5 и более раз) и синоптических СКО градиентов (в 2–3.5 раза), при этом сохраняется форма сезонного сигнала, что свидетельствует о надежности его определения в среднемесячных климатических полях ТПМ. Пример таких распределений для экстремума МГТ, расположенного в районе пониженного уровня сезонной изменчивости ТПМ, представлен на рис. 1, в, г.

Для сопоставления особенностей положения фронтов с орографией района и рельефом дна анализировалась донная топография из массива *GEBCO* (<http://www.gebco.net>) с разрешением по пространству 30 arc-seconds.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование климатических температурных фронтальных зон обусловлено существенной пространственно-временной неоднородностью поля температуры поверхности Черного моря (рис. 2, а–е; рис. 3, а–е). На пространственное распределение и изменчивость ТПМ, в первую очередь, влияют крупномасштабные процессы прогрева и выхолаживания вод, их адвекция Основным черноморским течением (ОЧТ), орография бассейна. На фоне этих крупномасштабных процессов развиваются региональные явления, такие как сток рек, поступление вод Азовского моря через Керченский пролив, развитие прибрежных апвеллингов, формирование в прибрежной зоне квазистационарных антициклонических вихрей и вдольбереговых течений (Вылканов и др., 1983; Решетников, 1984; Oguz et al., 1993; Algan et al., 2000; Korotaev et al., 2003; Боровская и др., 2005; Ginzburg et al., 2008b; Иванов, Белокопытов, 2011; Газетов и др., 2015).

Совместное влияние крупномасштабных и региональных процессов приводит к сложной картине распределения поля ТПМ и, как следствие, к достаточно сложному характеру распределений среднемесячных величин ПГТ (рис. 2; 3). В некоторые месяцы области повышенных значений ПГТ выстраиваются в определенном порядке, кото-



**Рис. 1.** Распределения среднегодовых величин МГТ, сезонного, синоптического и межгодового СКО ТПМ вдоль 30° в.д. (а) и 36° в.д. (б), внутригодовой ход среднемесячных климатических значений ТПМ (в) и величины МГТ (г) экстремума I и их синоптические СКО на 36° в.д.

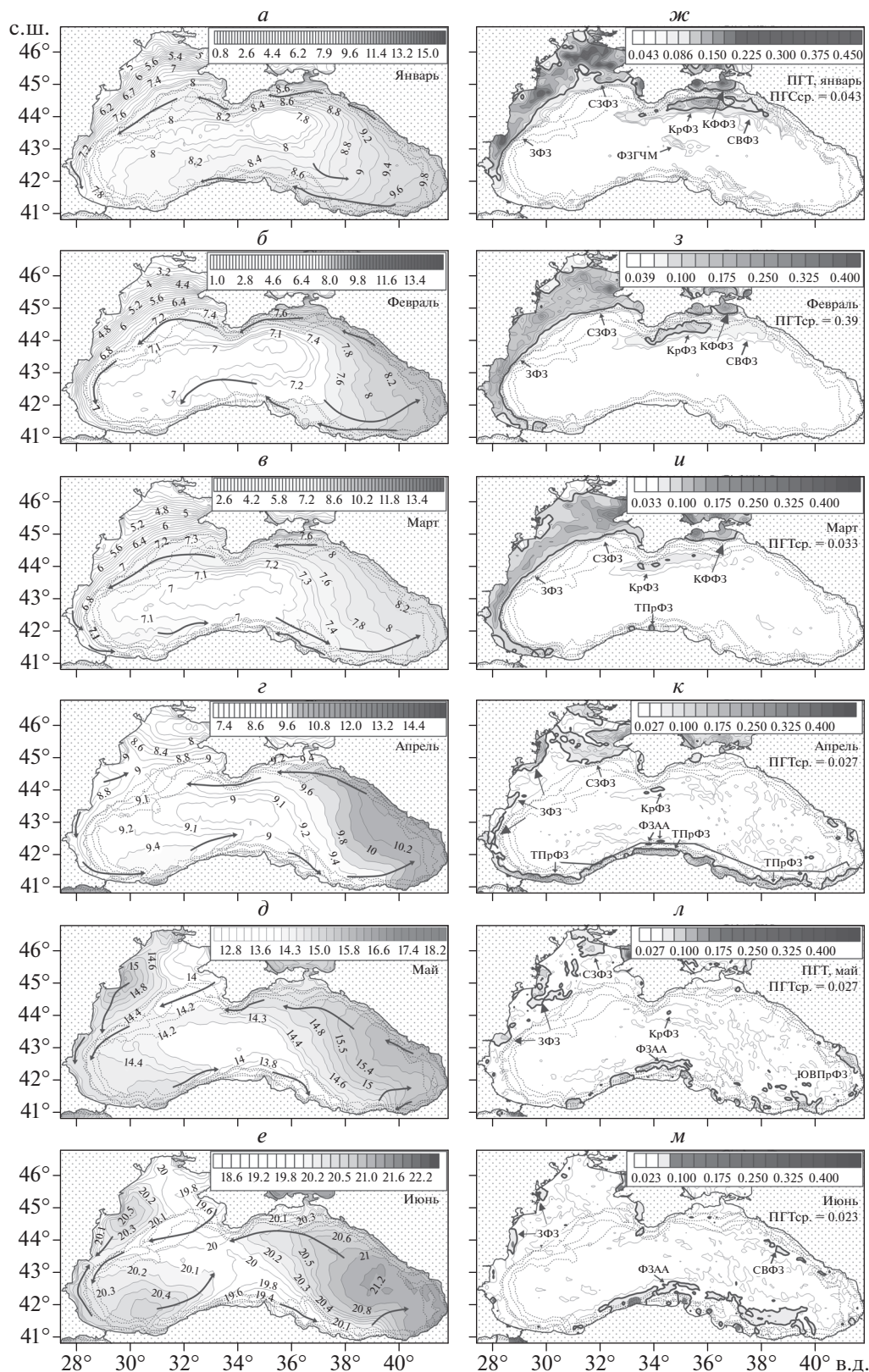
рый можно интерпретировать как проявление фронтальных зон, имеющих разную интенсивность, протяженность и существенно изменяющихся в течение года.

На основе анализа климатических среднемесячных распределений ПГТ были выделены следующие основные зоны – *Северо-западная* (СЗФЗ), *Западная* (ЗФЗ), *Турецкая прибрежная* (ТПрФЗ), *Фронтальная зона Анатолийского апвеллинга* (ФЗАА), *Юго-восточная прибрежная* (ЮВПрФЗ), *Северо-восточная* (СВФЗ), *Крымская* (КрФЗ), *Керченско-Феодосийская* (КФФЗ). В центральной части моря осенью и в начале зимы прослеживается широкая зона повышенных значений ПГТ, которая условно названа *Фронтальной зоной глубоководной части Черного моря* (ФЗГЧМ). Аббревиатура фронтальных зон представлена на картах распределения ПГТ (рис. 2, ж–м; рис. 3, ж–м). Далее структура фронтальных зон и соответствующих им фронтов рассматривается, начиная от

северо-западных берегов моря и далее против часовой стрелки по направлению потока ОЧТ.

### ФРОНТАЛЬНАЯ ЗОНА И ФРОНТЫ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

*Западная фронтальная зона* прослеживается по максимальному ступению изотерм и повышенным значениям ПГТ над прибрежным шельфом у западных берегов Черного моря. Она формируется в результате взаимодействия прибрежных шельфовых вод с водами, переносимыми ОЧТ. Мористая граница этой зоны проходит вдоль свала глубин примерно над изобатами 100–200 м, по мере расширения шельфа в северном направлении фронтальная зона также становится шире. Наибольшей ширины ЗФЗ достигает севернее м. Сфынту-Георге (44°53' с.ш.) над обширным северо-западным шельфом. Подробно этот квазизональный участок ЗФЗ рассматривался в работе (Артамонов и др.,



**Рис. 2.** Распределения ТПМ (а–е) и ПГТ (ж–м) с января по июнь. Здесь и на рис. 3 пунктирные линии – изобаты 100, 200, 1000 и 1500 м, СЗФЗ – Северо-западная, ЗФЗ – Западная, КрФЗ – Крымская, КФФЗ – Керченско-Феодосийская, СВФЗ – Северо-восточная, ТПрФЗ – Турецкая прибрежная и ЮВПрФЗ – Юго-восточная прибрежная фронтальные зоны, ФЗАА – Фронтальная зона Анатолийского апвеллинга, ФЗГЧМ – Фронтальная зона глубоководной части моря.



2017), в которой он был назван *Северо-западной фронтальной зоной*. В ее пределах были выделены три ветви общего Северо-западного фронта (СЗФ) – Прибрежная (ПрВСЗФ), Центральная (ЦВСЗФ) и Южная (ЮВСЗФ), располагающиеся, соответственно, над глубинами 10–20, 20–40 и 45–80 м (Артамонов и др., 2017).

Южнее северо-западного шельфа (к югу примерно от  $44.5^{\circ}$  с.ш.) климатическая структура и сезонная изменчивость ЗФЗ носят также достаточно сложный характер. Среднемесячные распределения ТПМ и ПГТ показывают, что максимальное сгущение изотерм и, соответственно, наибольшее развитие ЗФЗ наблюдается с января по март (рис. 2, *а–в, ж–и*). В этот период наиболее выражены контрасты между холодными прибрежными шельфовыми водами и более теплыми водами, поступающими сюда, судя по конфигурации изотерм, с Основным черноморским течением из восточной части моря. На всех картах распределения ТПМ направление основных “языков” вод с разными температурными характеристиками для большей наглядности показано стрелками (рис. 2, *а–е*; рис. 3, *а–е*). В феврале-марте ЗФЗ прослеживается вдоль всего западного побережья Черного моря вплоть до пролива Босфор и занимает практически всю шельфовую область (рис. 2, *з, и*). В этот период “язык” относительно теплых вод, переносимых ОЧТ, достигает прибосфорского района (рис. 2, *б, в*). В марте на юге ЗФЗ ослабевает, хотя “язык” трансформированных, но сохраняющих более высокую температуру вод еще прослеживается мористее даже Анатолийского побережья (рис. 2, *в*). Начиная с апреля, ЗФЗ заметно сужается и наблюдается ближе к берегу в виде отдельных областей повышенных значений ПГТ, наиболее четко выраженных в районах дельты Дуная и м. Калиакра ( $43^{\circ}22'$  с.ш.). Непосредственно над свалом глубин значения ПГТ заметно ослабевают (рис. 2, *к–м*; рис. 3, *ж, з*). Это связано с тем, что за счет весеннего прогрева температурные контрасты между более теплыми водами, переносимыми ОЧТ, и окружающими водами становятся менее заметными и “язык” теплых вод ОЧТ уже не прослеживается южнее  $44^{\circ}$  с.ш. (рис. 2, *г*). В мае ОЧТ захватывает более холодные воды, располагающиеся к западу от Крыма, и переносит их в юго-западном направлении (рис. 2, *д*). Этот перенос прослеживается по “языку” относительно холодных вод, вытянутому летом и в начале осени вдоль свала глубин вплоть до Босфора, при этом температурные контрасты этих вод с окружающими водами невелики. На крайнем юге в прибосфорском районе эти воды пониженной температуры прослеживаются до ноября-декабря, в то время, когда на севере у берегов Крыма снова появляется область теплых вод, которые поступают с ОЧТ с востока (рис. 2, *е*; рис. 3, *а–е*). С ноября теплые воды ОЧТ начинают распро-

страняться вдоль западного побережья на юг и к концу зимы опять достигают прибосфорского района (рис. 2, *а, б*; рис. 3, *д, е*). Вследствие этого с конца осени ЗФЗ снова постепенно расширяется и вытягивается в южном направлении, достигая максимального развития в конце зимы (рис. 2, *ж, з*; рис. 3, *л, м*).

На формирование ЗФЗ влияет не только крупномасштабная адвекция ОЧТ вод разной температуры вдоль свала глубин, но и сезонная перестройка поля ТПМ над прибрежным шельфом. Непосредственно у берега вдоль всего западного побережья большую часть года прибрежные воды над глубинами до 20–30 м холоднее вод, расположенных мористее. Более низкую температуру прибрежных вод в разные сезоны и на разных участках побережья можно объяснить различными факторами. Севернее м. Калиакра, где шельф относительно широк, с декабря по март происходит интенсивное выхолаживание и на мелководье располагаются наиболее холодные воды. В апреле в районе дельты Дуная над глубинами до 20–30 м появляется область относительно теплых вод (рис. 2, *г*), наиболее вероятной причиной формирования которой может быть интенсивный сток Дунайских вод, достигающий максимума в апреле (Газетов и др., 2015). Уже в мае это пятно теплых вод расширяется и смещается на юго-восток, а у берега воды снова оказываются более холодными. Дунайские воды захватываются южным течением, проходящим над шельфом восточнее дельты Дуная (Вылканов и др., 1983), или восточными перифериями прибрежных антициклонов (Дунайский, Констанца и Калиакра) (Korotaev et al., 2003) и летом распространяются на юг почти до  $43.5^{\circ}$  с.ш. Контрасты температуры между этими теплыми водами и более холодными окружающими водами постепенно уменьшаются, и в сентябре эта область практически размывается (рис. 2, *д, е*; рис. 3, *а–в*). В летне-осенний период структура поля ТПМ в пределах ЗФЗ формируется под влиянием вновь возникающих особенностей прибрежной циркуляции. Примерно с июня по декабрь прибрежные воды и воды, переносимые ОЧТ вдоль свала глубин, разделяются “языком” более теплых вод примерно между изобатами 30 и 150 м, который ориентирован на северо-запад вдоль направления береговой черты. Причиной формирования этого “языка” является адвекция теплых вод от западных берегов Анатолии вдольбереговым северо-западным противотечением (Вылканов и др., 1983) или прибрежными перифериями антициклонических круговоротов – Сакарья, Босфорского, Калиакра, Констанца и Дунайского (Korotaev et al., 2003). Летом этот “язык” прослеживается до м. Калиакра, осенью – почти до дельты Дуная, в декабре заметно ослабевает и не прослеживается севернее  $42^{\circ}$  с.ш. (рис. 2, *е*; рис. 3, *а–е*). Южнее м. Калиакра прибрежный шельф заметно сужается и

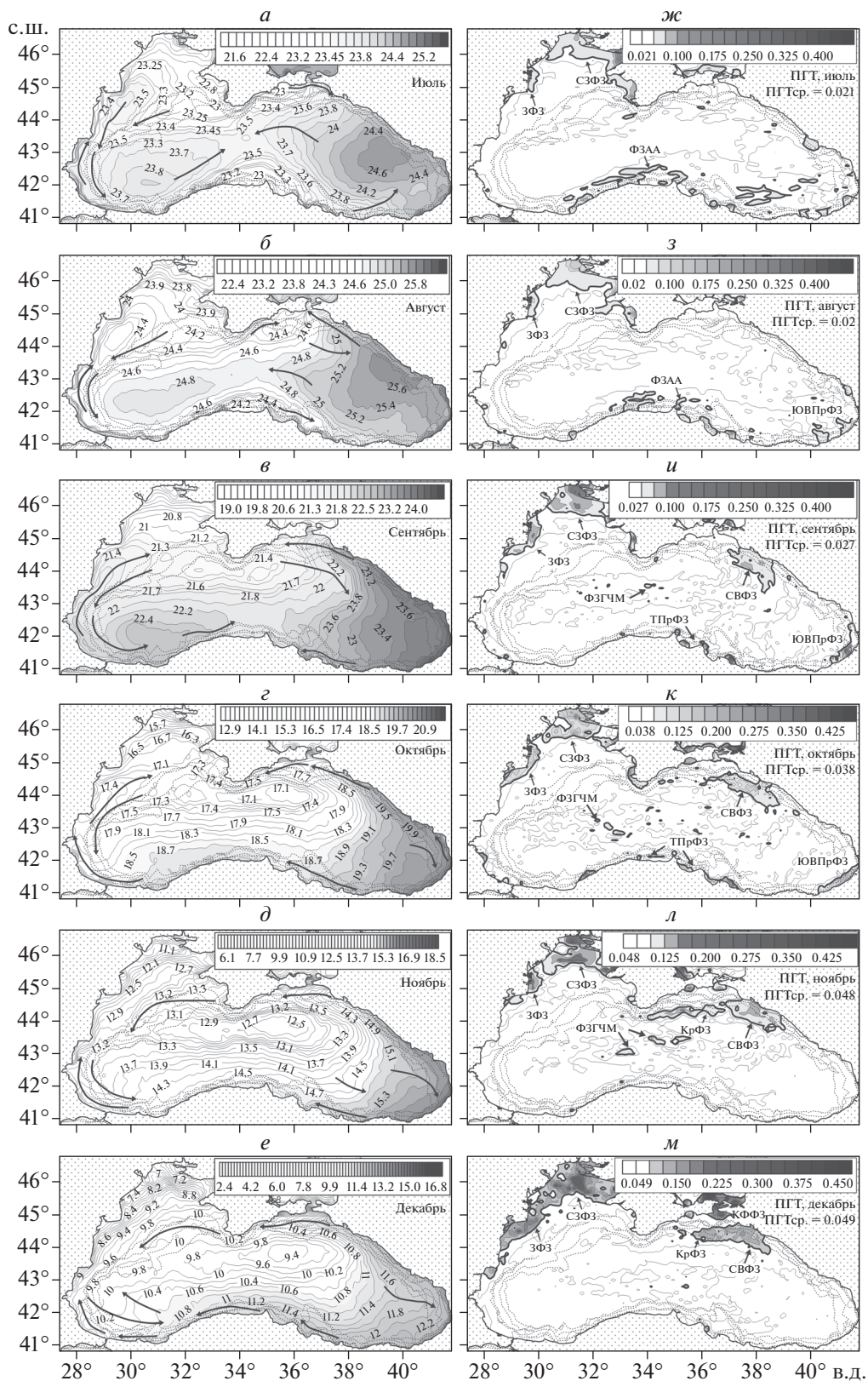
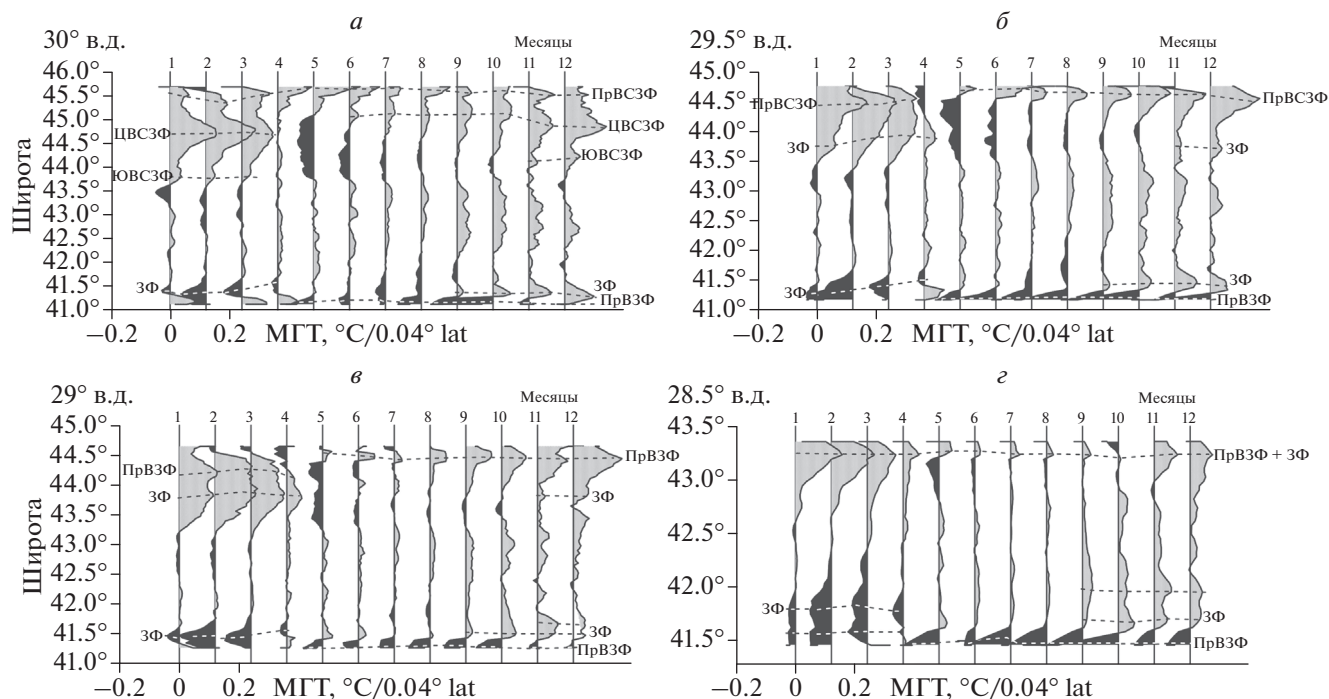


Рис. 3. Распределения ТПМ (а–е) и ПГТ (ж–м) с июля по декабрь.



**Рис. 4.** Распределения среднемесячных МГТ вдоль 30° в.д. (а), 29.5° в.д. (б), 29° в.д. (в) и 28.5° в.д. (г). ПрВЗФ – Прибрежная, ЦВСЗФ – Центральная и ЮВСЗФ – Южная ветви Северо-западного фронта, ПрВЗФ – Прибрежная ветвь Западного фронта, ЗФ – Западный фронт.

зимние контрасты температуры, возникающие за счет перепада глубин на шельфе, ослабевают. В течение остальной части года прибрежные воды характеризуются более низкой температурой, чем воды, поступающие от западных берегов Анатолии.

Анализ распределений МГТ и ЗГТ показал, что количество основных фронтальных разделов в пределах ЗФЗ южнее северо-западного шельфа изменяется по сравнению с СЗФЗ. Если вдоль 30° в.д., где шельф достаточно широк, еще прослеживаются три ветви зонального Северо-западного фронта с соответствующими диапазонами глубин 5–25, 30–50 и 80–90 м (рис. 4, а; рис. 5, а), то западнее 30° в.д. (рис. 4, б–г) и южнее 44.5° с.ш. (рис. 5, б–г) выделяются в основном две ветви, которые называются **Западным фронтом (ЗФ)** и **Прибрежной ветвью Западного фронта (ПрВЗФ)**.

Зимой и в начале весны **Западный фронт** служит границей более холодных шельфовых вод и теплых вод, переносимых ОЧТ, и прослеживается вдоль всего побережья в виде экстремума положительных значений ЗГТ (рис. 5). В поле МГТ севернее примерно 42.5° с.ш., где ЗФЗ и соответственно ветви ЗФ ориентированы с северо-востока на юго-запад, они проявляются в виде экстремумов положительных значений градиентов. Южнее 42.5° с.ш., где ветви ЗФ поворачивают на юго-восток и восток, они проявляются в виде экстремумов отрицательных значений МГТ (рис. 4). В

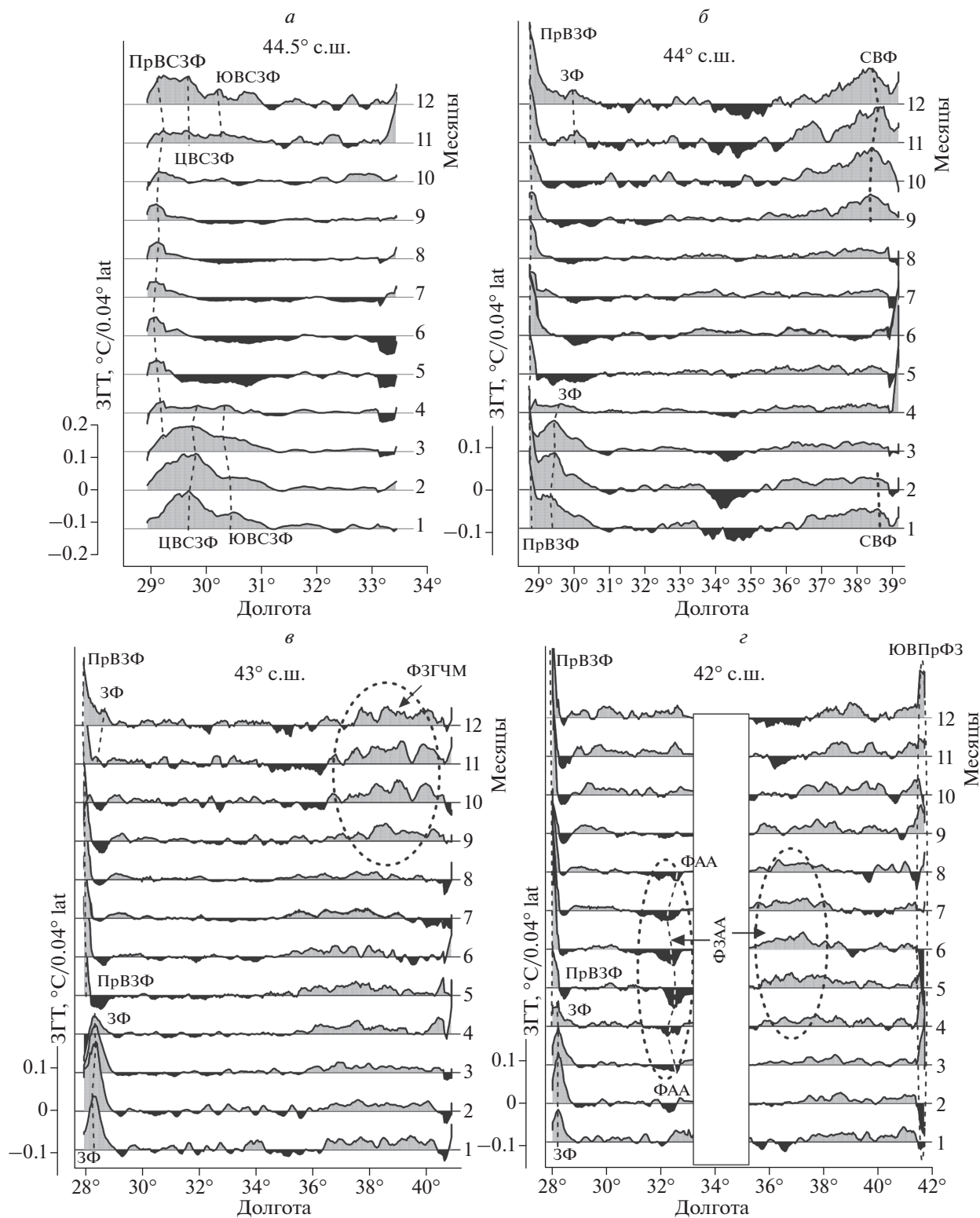
период, когда ОЧТ переносит более холодные воды, ЗФ в поле ЗГТ практически не прослеживается, над свалом глубин наблюдаются очень слабые отрицательные значения градиентов (рис. 5).

В поле МГТ севернее 42.5° с.ш. наблюдаются их слабые отрицательные значения. В сентябрь-декабре, когда воды пониженной температуры, переносимые ОЧТ, достигают прибосфорского района и взаимодействуют с теплыми водами, поступающими от западных берегов Анатолии, южнее 42° с.ш. наблюдается усиление положительных значений МГТ, которые можно интерпретировать как проявление ЗФ (рис. 4).

Сезонные особенности адвекции теплых и холодных вод ОЧТ в западной части моря сказываются на периоде существования и времени обострения ЗФ. Так, в поле зональных градиентов севернее 43° с.ш. Западный фронт прослеживается с ноября по апрель, южнее – с января по апрель (рис. 5, б). Максимальные значения ЗГТ (~0.15–0.2) отмечаются в январе на 44° с.ш. и в феврале на 43° и 42° с.ш. (рис. 6).

Сокращение времени существования фронта и запаздывание его интенсификации в южном направлении в период переноса ОЧТ теплых вод проявляется также и в распределении меридиональных градиентов. На 29°–29.5° в.д. на севере ЗФ прослеживается с ноября по апрель с максимальными значениями МГТ в январе (~0.35) (рис. 4, б, в). На





**Рис. 5.** Распределения среднемесячных ЗГТ ( $^{\circ}\text{C}/0.04^{\circ}\text{lat}$ ) вдоль  $44.5^{\circ}$  с.ш. (а),  $44^{\circ}$  с.ш. (б),  $43^{\circ}$  с.ш. (в) и  $42^{\circ}$  с.ш. (з). ПрВСЗФ – Прибрежная, ЦВСЗФ – Центральная и ЮВСЗФ – Южная ветви Северо-западного фронта, ЗФ и ПрВЗФ – Западный фронт и его Прибрежная ветвь, СВФ – Северо-восточный фронт, ЮВПрФЗ – Юго-восточная прибрежная фронтальная зона, ФЗАА и ФАА – Фронтальная зона и Фронт Анатолийского апвеллинга, ФЗГЧМ – Фронтальная зона глубоководной части моря.

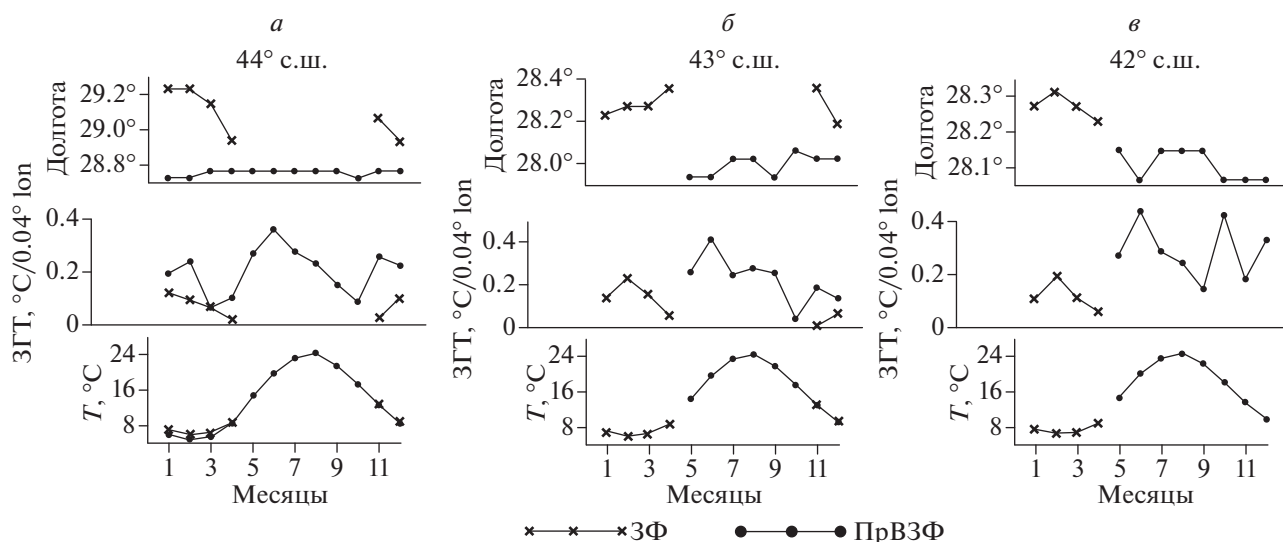


Рис. 6. Внутригодовой ход долготного положения, величины ЗГТ и температуры Западного фронта (ЗФ) и его Прибрежной ветви (ПрВЗФ) на 44° с.ш. (а), 43° с.ш. (б) и 42° с.ш. (в).

юге в прибосфорском районе (28.5°–29.5° в.д.) ЗФ прослеживается с января по апрель. Здесь максимум МГТ наблюдается в феврале (~–0.2) (рис. 4, б–г). В ноябре–декабре наблюдается усиление положительных значений МГТ (до ~0.1–0.15) (рис. 4).

**Прибрежная ветвь Западного фронта** прослеживается непосредственно у берега и служит границей между разными модификациями шельфовых вод. Этот фронт, так же как ЗФ, в зависимости от сезона и широтного положения может образовываться под влиянием разных факторов. Так, несколько севернее дельты Дуная (на 30° в.д.), где еще прослеживается Прибрежная ветвь Северо-западного фронта, у берега над глубинами 5–25 м в течение всего года наблюдается интенсивный экстремум положительных значений МГТ (рис. 4, а). С сентября по март он образуется в результате взаимодействия прибрежных вод, располагающихся над глубинами меньше 25 м, с водами более теплой модификации мористой части шельфа. С апреля по август фронт смещается непосредственно к самому берегу и формируется в результате взаимодействия прибрежных вод с более теплыми Дунайскими водами. В сезонном цикле основной максимум интенсивности ПрВЗФ наблюдается в мае (МГТ ~ 0.3) (рис. 4, а).

Южнее, между м. Мидия и м. Калиакра (примерно между 44°24' и 43°22' с.ш.) ПрВЗФ прослеживается у берега в течение почти всего года в виде интенсивных экстремумов положительных значений МГТ (рис. 4, б, в) и ЗГТ (рис. 5, б). С декабря по март эта ветвь формируется вследствие взаимодействия холодных зимних прибрежных вод, образующихся над глубинами менее 30–35 м, с менее охлажденными водами, располагающи-

мися мористее над глубинами шельфа 35–60 м. В апреле область более холодных прибрежных вод расширяется и охватывает шельф до глубин 60 м и фронт заметно ослабевает (рис. 2, г, к; рис. 5, б). С мая по август в этом районе ПрВЗФ формируется в результате взаимодействия прибрежных вод с более теплыми Дунайскими водами, поступающими с севера (рис. 2, д, е; рис. 3, а, б). В осенний период (сентябрь–ноябрь) формирование ПрВЗФ происходит в результате взаимодействия охлаждающихся на мелководье прибрежных вод и более теплых вод, проникающих сюда с юга от западных берегов Анатолии (рис. 3, в–д). Таким образом, формирование ПрВЗФ между м. Мидия и м. Калиакра вследствие взаимодействия прибрежных вод с тремя разными типами вод обусловило наличие трех максимумов во внутригодовом ходе интенсивности зональной составляющей градиента во фронте. Так, на 44° с.ш. основной максимум (ЗГТ ~ 0.35) наблюдается в июне, два других (ЗГТ ~ 0.25) – в ноябре и в феврале (рис. 6, а). Во внутригодовом распределении меридиональной составляющей градиента на 29° и 29.5° в.д. более четко выражены два максимума усиления фронта – в феврале (~0.3) и в июне (~0.15–0.2) (рис. 4, б, в).

Отметим, что на траверсе м. Калиакра, где ширина шельфа минимальна, происходит слияние Прибрежной ветви и собственно ЗФ в единый фронт и на распределениях МГТ вдоль 28.5° в.д. в течение всего года наблюдается только один экстремум. Этот фронт проходит над глубинами 45–60 м и наиболее интенсивен (МГТ ~ 0.3) в январе–феврале (рис. 4, г).

Южнее м. Калиакра, где шельф остается относительно узким, зимние контрасты температуры, возникающие за счет перепада глубин на шельфе,

ослабевают и экстремум ЗГТ, соответствующий ПрВЗФ, с января по апрель отсутствует (рис. 5, в, г). ПрВЗФ начинает образовываться примерно с мая, когда холодные прибрежные вод взаимодействуют с более теплыми водами, поступающими от западных берегов Анатолии (рис. 2, д, е; рис. 3, а–е). Во внутригодовом ходе интенсивности на 43° с.ш. основное усиление ПрВЗФ (ЗГТ ~ 0.4) происходит в июне (рис. 6, б). Южнее, на 42° с.ш. и в при-босфорском районе (28.5°–30° в.д.) фронт усиливается два раза в год – в мае–июне и в октябре. Значения МГТ и ЗГТ в период обострения фронта составляют –0.3 и 0.45 соответственно (рис. 4, б–г; рис. 6, в). Обострение фронта в этом районе два раза в год может быть обусловлено летним и осенним усилением северо-западного противотечения (Вылканов и др., 1983).

### ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ И ФРОНТЫ У СЕВЕРНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ТУРЦИИ

В южной части моря к востоку от Босфора сгущения изотерм, свидетельствующие об образовании крупномасштабных фронтальных зон, менее выражены, чем у западного побережья. Вместе с тем, пространственные распределения ТПМ в этом регионе также крайне неоднородны и существенно изменяются в течение года, что обуславливается процессами прогрева и выхолаживания вод Черного моря и их адвекцией ОЧТ, а также развитием Анатолийского апвеллинга, стоком рек, формированием антициклонических вихрей к югу от ОЧТ (Решетников, 1984; Oguz et al., 1993; Algan et al., 2000; Korotaev et al., 2003; Боровская и др., 2005; Ginzburg et al., 2008b; Иванов, Белокопытов, 2011) (рис. 2, а–е; рис. 3, а–е).

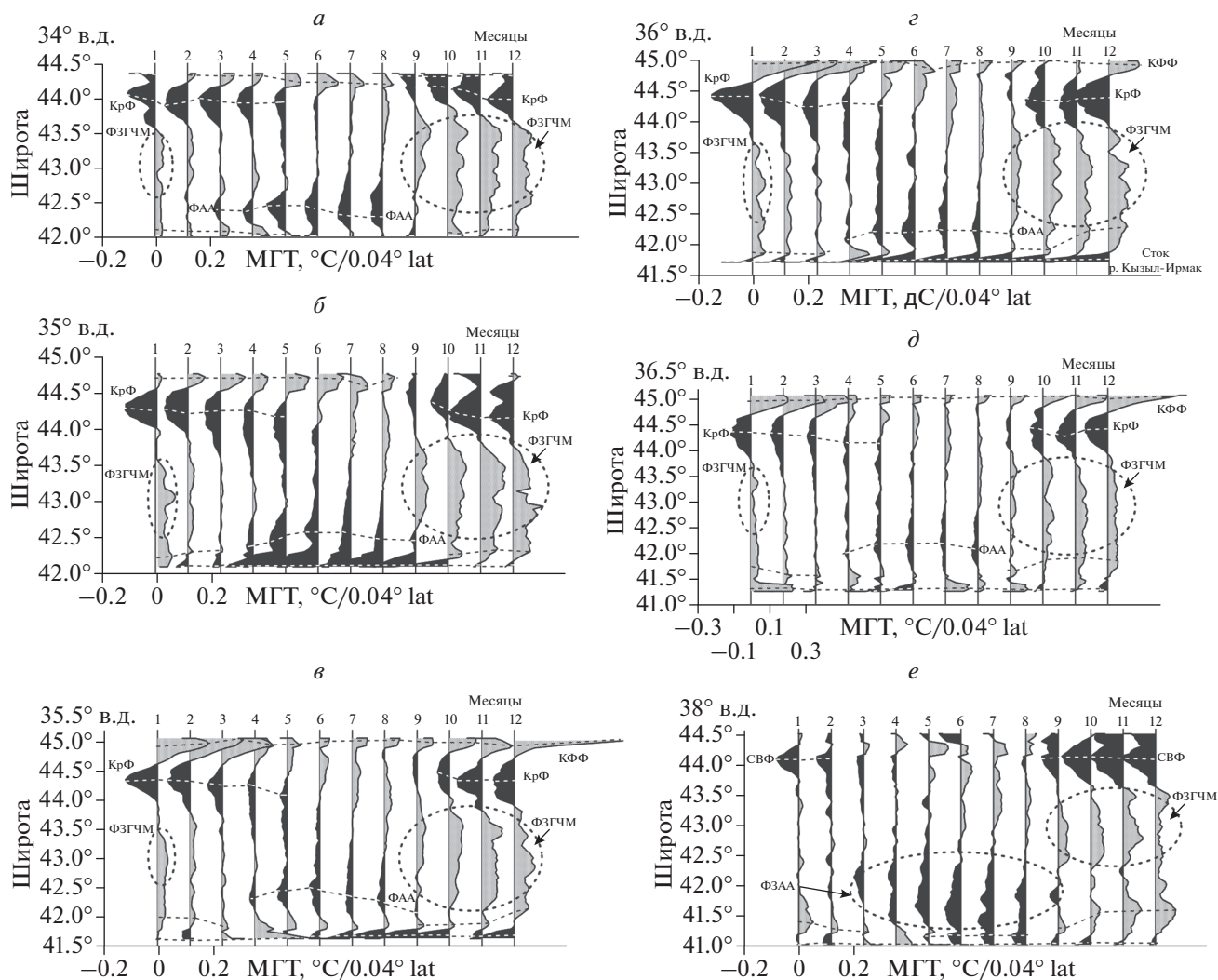
Климатические распределения ТПМ показали, что Анатолийский апвеллинг начинает развиваться в марте, когда несколько восточнее м. Кермепе прослеживается область холодных вод, которая в открытом море вытягивается на восток по направлению ОЧТ (рис. 2, в). В апреле эта область расширяется и с мая по август охватывает обширное пространство вдоль побережья примерно от 32° до мыса Джива (около 36.5° в.д.), при этом часть трансформированных апвеллинговых вод проникает с ОЧТ дальше на восток почти до 39° в.д. (рис. 2, г–е; рис. 3, а, б). С сентября по март вдоль восточной части Анатолийского побережья наблюдается “язык” более теплых вод, вытягивающийся в западном направлении и прослеживающийся в декабре–январе почти до 33° в.д. (рис. 2, а–в; рис. 3, в–е). Причиной формирования этого “языка”, вероятнее всего, служит перенос теплых вод из юго-восточного “угла” моря на запад вдоль южных периферий квазистационарных антициклонических вихрей (Батумский, Кызыл-Ирмак, Синопский). Северная граница этого “языка” проявляется с сентября по март на распределениях МГТ

между 34° и 38° в.д. в виде экстремумов их положительных значений (рис. 7). В сентябре эта граница располагается ближе к берегу, а зимой смещается в мористом направлении.

Влияние стока крупных рек северного побережья Турции (Сакарья, Кызыл-Ирмак, Ешил-Ирмак, Енидже и др.) проявляется в узкой прибрежной полосе в виде локальных пятен вод с резко отличающимися температурными характеристиками (рис. 2, а–е; рис. 3, а–е). Площадь, конфигурация этих пятен и температура воды в них существенно изменяются в зависимости от сезона и орографических особенностей бассейна рек. При взаимодействии стоковых вод с водами, расположенных мористее, у берега формируются зоны повышенных значений ПГТ. В апреле, в период интенсивного весеннего половодья (Решетников, 1984) и начала прогрева вод на шельфовых участках непрерывная полоса высоких значений ПГТ простирается практически вдоль всего побережья Турции от Босфора до м. Фенер (рис. 2, к). В данной работе эта полоса повышенных значений ПГТ названа *Турецкой прибрежной фронтальной зоной* (ТПрФЗ). Фактически как единая фронтальная зона она прослеживается только в апреле, а в остальные месяцы можно выделить только ее отдельные участки. При этом знак прибрежного экстремума МГТ на этих участках ТПрФЗ может изменяться в зависимости от района и сезона. Ниже представлены несколько типичных примеров, характеризующих эту изменчивость.

В центральной части Анатолийского побережья (34° в.д.) большую часть года прибрежный экстремум МГТ характеризуется положительным знаком (рис. 7, а). С октября по февраль этот экстремум формируется в результате взаимодействия теплых вод, проникающих вдоль берега с востока, с более холодными водами, располагающимися мористее. В апреле–мае положительный экстремум МГТ обусловлен взаимодействием более теплых вод, образующихся на относительно широком шельфе в результате весеннего прогрева, с апвеллинговыми водами, расположенными в эти месяцы мористее над свалом глубин. Величины МГТ достигают максимума (до 0.2) в апреле и октябре. Летом, в период максимального развития апвеллинга, когда более холодные воды охватывают весь шельф, прибрежный экстремум МГТ заметно ослабевает.

Восточнее, в районе м. Инджебурун (35° в.д.), где наблюдаются резкий выступ береговой линии и очень узкий шельф, в течение большей части года наблюдается интенсивный прибрежный экстремум отрицательных значений МГТ (рис. 7, б). Он начинает прослеживаться в феврале, максимально усиливается (МГТ ~ –0.35) в июне, в период наибольшего развития апвеллинга, и практически размывается к концу года.



**Рис. 7.** Распределения среднемесячных МГТ ( $^{\circ}\text{C}/0.04^{\circ}\text{lat}$ ) вдоль  $34^{\circ}$  в.д. (а),  $35^{\circ}$  в.д. (б),  $35.5^{\circ}$  в.д. (в),  $36^{\circ}$  в.д. (г),  $36.5^{\circ}$  в.д. (д) и  $38^{\circ}$  в.д. (е). КрФ – Крымский, СВФ – Северо-восточный и КФФ – Керченско-Феодосийский фронты, ФЗАА и ФАА – Фронтальная зона и Фронт Анатолийского апвеллинга, ФЗГЧМ – Фронтальная зона глубоководной части моря.

В Синопском заливе ( $35.5^{\circ}$  в.д.), где прибрежный шельф заметно расширяется и хорошо выражен эффект весеннего прогрева вод над глубинами менее 50 м, экстремум МГТ в марте–мае характеризуется положительным знаком (рис. 7, в). Величины положительных значений МГТ достигают максимума (до 0.15) в апреле, когда температурные контрасты усиливаются за счет взаимодействия прогреваемых шельфовых вод с холодными водами апвеллинга, располагающимися над свалом глубин (рис. 2, г). В остальное время года прибрежный экстремум МГТ имеет отрицательный знак. С июня по август в прибрежную часть залива с глубинами менее 50 м проникают апвеллинговые воды низкой температуры, которые холоднее вод, расположенных мористее (рис. 2, е; рис. 3, а–в). Начиная с сентября, когда апвеллинг

ослабевает, отрицательный знак МГТ сохраняется за счет появления над свалом глубин более теплых вод, проникающих с востока (рис. 3, г–е). Максимум отрицательных значений МГТ ( $\sim -0.5$ ) наблюдается в сентябре.

В районе м. Бафра ( $36^{\circ}$  в.д.) в течение года у самого берега наблюдается экстремум отрицательных значений МГТ (рис. 7, г). Этот экстремум обусловлен постоянным выносом холодных вод р. Кызыл-Ирмак, бассейн которой располагается на высоких горных массивах (Кызылдаг, Анатолийское плоскогорье, Северо-Анатолийские горы). Величины МГТ достигают максимума с октября по декабрь ( $\sim -0.4 \dots -0.5$ ), второе увеличение МГТ ( $\sim -0.3$ ) происходит в мае, т.е. в периоды, когда согласно (Решетников, 1984; Algan et al., 2000) наблюдается максимальный сток.



В бухте Самсун (36.5° в.д.) прибрежный экстремум МГТ изменяет знак два раза в год (рис. 7, *д*). Отрицательные значения МГТ наблюдаются в мае-июне (до -0.2), когда максимально влияние холодного стока р. Ешил-Ирмак, и в ноябре-декабре (до -0.1), когда в бухте происходит сезонное охлаждение прибрежных вод. Заметные положительные градиенты МГТ зимой (максимум ~0.9 в январе) связаны с затоком теплых вод с востока, а в июле-августе (до 0.35) — с летним прогревом прибрежных вод.

Восточнее мыса Чам (38° в.д.) внутригодовая изменчивость прибрежного экстремума МГТ снова изменяется (рис. 7, *е*). С марта по май наблюдаются положительные градиенты МГТ с максимумом (~0.1) в апреле, когда у берега на мелководье начинается весенний прогрев. Остальную часть года у берега преобладают отрицательные значения МГТ, достигающие максимальных значений (~-0.1) в июне-августе. В эти месяцы часть холодных вод Анатолийского апвеллинга распространяется вдоль берега на восток почти до 38.5° в.д. (рис. 2, *е*; рис. 3, *а, б*).

Таким образом, рассмотренные примеры показывают, что на разных участках ТПрФЗ на формирование прибрежных экстремумов МГТ, их знак и интенсивность оказывают влияние орграфические особенности (выступы береговой линии, ширина шельфа), процесс прогрева и выхолаживания в мелководной части, сток рек и адвекция вод из соседних районов.

Кроме локальных прибрежных процессов на распределениях ПГТ у берегов Турции проявляется более крупномасштабное явление — Анатолийский апвеллинг. Весной, когда Анатолийский апвеллинг начинает развиваться, мористее свала глубин формируется зона повышенных значений ПГТ, которая выглядит сначала в виде отдельных пятен (рис. 2, *к*), а затем вытягивается в единую полосу. Эта зона характеризует внешнюю границу апвеллинга и названа **Фронтальной зоной Анатолийского апвеллинга** (ФЗАА), а соответствующий ей фронт — **Фронтом Анатолийского апвеллинга** (ФАА). Фронтальная зона Анатолийского апвеллинга наиболее развита в мае-июне, в июле-августе она ослабевает, а в сентябре практически разрушается (рис. 2, *л, м*; рис. 3, *ж-и*). На распределении зональных градиентов вдоль 42° с.ш. ФЗАА проявляется в конце весны и летом в виде широкой полосы их повышенных значений, отрицательных к западу от 33.2° в.д. и положительных к востоку от 35.2° в.д. (рис. 5, *з*). В поле меридиональных градиентов ФЗАА прослеживается примерно между 33° и 39° в.д. в виде полосы высоких отрицательных значений МГТ (рис. 7). Внутри ФЗАА можно выделить несколько экстремумов ЗГТ и МГТ, характеризующих разную степень трансформации апвеллинговых вод, при

этом самый интенсивный из экстремумов рассматривался как проявление Фронта Анатолийского апвеллинга (рис. 5, *з*; рис. 7, *а-д*). Экстремум МГТ, соответствующий ФАА, прослеживается севернее прибрежного экстремума, связанного с ТПрФЗ, и между 34° и 37° в.д. наблюдается с марта-апреля по август-сентябрь (рис. 7, *а-д*). Время наступления максимального обострения фронта запаздывает в восточном направлении примерно на месяц. Западнее 35.5° в.д. ФАА усиливается в мае (ЗГТ ~ -0.1, МГТ ~ -0.15), восточнее — в июне (ЗГТ ~ 0.1, МГТ ~ -0.1) (рис. 5, *з*; рис. 7, *а-д*).

Восточнее 37° в.д. градиенты в пределах ФЗАА несколько усиливаются за счет взаимодействия трансформированных апвеллинговых вод, переносимых ОЧТ на восток, с более теплыми водами, расположенными мористее. Последние начинают появляться в апреле в очаге интенсивного прогрева у восточных берегов моря в зоне “ветровой тени” Большого Кавказского хребта (рис. 2, *з*). Затем область этих теплых вод расширяется в южном и западном направлении и летом — в начале осени охватывает почти всю юго-восточную часть моря (рис. 2, *д, е*; рис. 3, *а-в*). В результате ФЗАА вытягивается далеко на восток вплоть до 39° в.д. На распределении МГТ вдоль 38° в.д. ФЗАА проявляется в виде широкой полосы их повышенных отрицательных значений с несколькими экстремумами примерно равной интенсивности, поэтому выделить ФАА здесь затруднительно (рис. 7, *е*). В этом районе величины градиентов в ФЗАА достигают максимума примерно на месяц позже, чем в центральной части Анатолийского побережья — в июне-июле (МГТ ~ -0.15).

Еще одна область повышенных значений ПГТ наблюдается большую часть года у юго-восточного побережья моря — **Юго-восточная прибрежная фронтальная зона** (ЮВПрФЗ) (рис. 2, *ж-м*; рис. 3, *ж-м*). Она вытягивается примерно от м. Фенер вдоль берегов Турции и Грузии почти до м. Искурия (42°47'32" с.ш.). На этом участке побережья Черного моря в течение большей части года у самого берега располагаются более теплые воды, чем в открытой части моря, при этом наибольшие контрасты ТПМ здесь наблюдаются два раза в год. Увеличение положительных значений ЗГТ (42° с.ш.) отмечается в апреле (~0.2) и декабре (~0.35). Появление двух максимумов ЗГТ обусловлено тем, что на температуру прибрежных вод влияет сток рек (Чорох, Супса, Риони и Ингури). Периоды усиления речного стока в конце весны-начале лета во время весеннего половодья и зимой после периода обильных осадков соответствуют периодам ослабления положительных значений ЗГТ и появления их отрицательных значений. Наибольшие отрицательные значения ЗГТ отмечаются в феврале (~-0.15) и июне (~-0.3) (рис. 5, *з*).

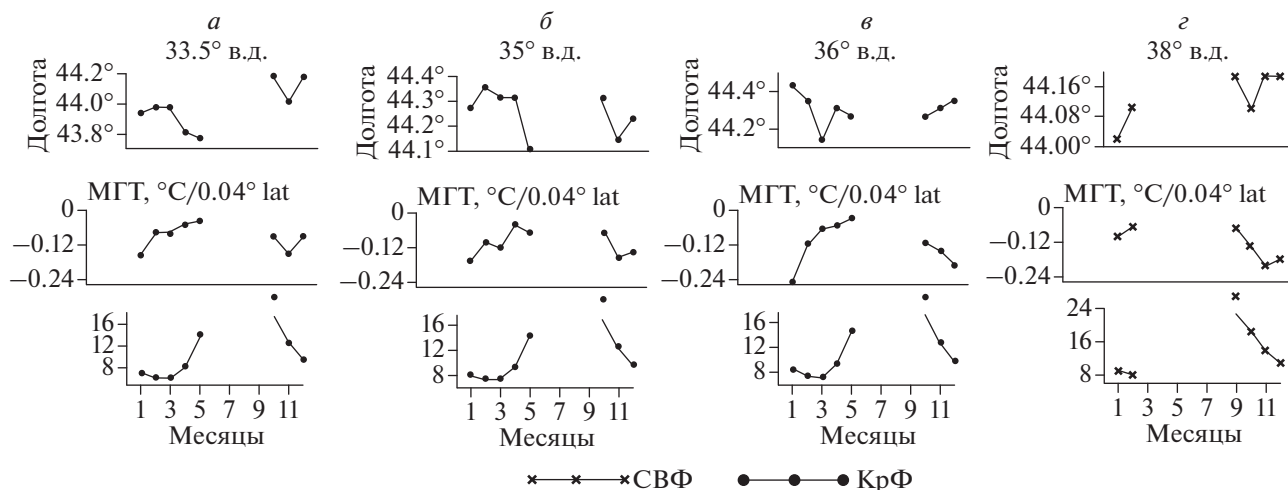


Рис. 8. Внутригодовой ход широтного положения, величины МГТ и температуры Крымского фронта (КрФ) на 33.5° в.д. (а), 35° в.д. (б), 36° в.д. (в) и Северо-восточного фронта (СВФ) на 38° в.д. (з).

### ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ И ФРОНТЫ У КАВКАЗСКОГО И КРЫМСКОГО ПОБЕРЕЖИЙ

В северо-восточной части моря, кроме сезонных процессов прогрева и выхолаживания, на крупномасштабную структуру поля ТПМ заметно влияет адвекция теплых вод ОЧТ вдоль Кавказского и Крымского побережий. Контрасты температуры наиболее выражены между водами ОЧТ и более холодными водами открытой части моря, в связи с чем севернее примерно 43.5° с.ш. появляются обширные зоны повышенных значений ПГТ. Период существования, конфигурация и протяженность этих зон существенно изменяются в зависимости от времени года. В сентябре, когда “язык” теплых вод хорошо прослеживается только у северной части Кавказского побережья, зона высоких значений ПГТ наблюдается над материковым склоном между 43.5° и 44.5° с.ш. (рис. 3, в, и). В октябре она вытягивается почти до Керченского полуострова (рис. 3, к). Начиная с ноября “язык” теплых вод простирается далеко на запад и, несмотря на их значительную трансформацию, область повышенных значений ПГТ прослеживается вплоть до траверза Гераклеийского полуострова (рис. 2, ж–л; рис. 3, л, м). Отметим, что у берегов Крыма эта зона прослеживается до апреля-мая, в то время как восточнее Керченского пролива значения ПГТ заметно ослабевают уже с февраля. Учитывая пространственные особенности изменчивости зоны высоких ПГТ, в ее пределах целесообразно выделить две отдельные фронтальные зоны – *Северо-восточную* (СВФЗ), наиболее четко прослеживающуюся с сентября по февраль (рис. 2, ж, з; рис. 3, и–м), и *Крымскую* (КрФЗ), наблюдающуюся с октября по май (рис. 2, ж–л; рис. 3, к–м).

Соответствующий КрФЗ *Крымский фронт* (КрФ) проявляется в виде экстремумов отрицательных значений МГТ (рис. 7, а–д), которые наиболее интенсивны в районе 35°–36.5° в.д., при этом на всем протяжении фронт максимально обостряется в январе (МГТ ~ -0.15 – -0.25) (рис. 8, а–в).

*Северо-восточный фронт* (СВФ), соответствующий СВФЗ, проявляется в виде экстремумов положительных значений ЗГТ (44° с.ш.) (рис. 5, б) и отрицательных значений МГТ (38° в.д.) (рис. 7, е). Максимальной интенсивности фронт достигает в ноябре (ЗГТ ~ 0.15, МГТ ~ -0.2) (рис. 5, б; рис. 8, з).

Северо-восточный и Крымский фронты представляют собой мористую границу “языка” теплых вод, переносимых ОЧТ. Прибрежная граница этого “языка” наиболее четко проявляется между Таманским полуостровом и Феодосийским заливом в виде полосы повышенных значений ПГТ, которую можно выделить в отдельную *Керченско-Феодосийскую фронтальную зону* (КФФЗ). Эта зона наиболее интенсивна в холодный период года с ноября по март, когда температурные контрасты усиливаются за счет взаимодействия, с одной стороны, теплых вод, переносимых ОЧТ, и с другой стороны – более холодных Азовских вод, поступающих из Керченского пролива, и охлажденных вод мелководного Феодосийского залива. В этот период КФФЗ прослеживается над глубинами менее 100 м между Таманским полуостровом и м. Меганом, значения МГТ в ней имеют положительный знак (рис. 2, ж–и; рис. 3, л–м). Летом “язык” теплых вод ОЧТ практически исчезает, но за счет развития апвеллинга в Феодосийском заливе и к югу от Керченского полуострова (Боровская и др., 2005) прибрежные воды остаются более холодными и знак МГТ сохраняется.

Соответствующий КФФЗ фронт – **Керченско-Феодосийский** (КФФ) хорошо проявляется по экстремуму положительных значений МГТ, которые достигают максимума в декабре в районе Керченского пролива ( $36.5^\circ$  в.д.) и Феодосийского залива ( $35.5^\circ$  в.д.) (МГТ  $\sim 0.5$  и  $0.8$  соответственно) (рис. 7, *д, в*). Между основными источниками холодных вод у побережья Керченского полуострова ( $36^\circ$  в.д.) максимум интенсивности наступает на месяц позже – в январе (МГТ  $\sim 0.25$ ) (рис. 7, *г*).

Западнее м. Меганом у побережья, судя по низким значениям ПГТ, фронтальная зона явно не прослеживается. Вместе с тем, с конца зимы до конца лета у берега наблюдаются положительные значения МГТ (рис. 7, *а, б*), свидетельствующие о том, что прибрежные воды холоднее вод, расположенных мористее. Зимой-весной положительный знак МГТ поддерживается за счет поступления сюда теплых вод ОЧТ с востока. С мая по июль положительные значения МГТ усиливаются вследствие развития апвеллингов у берегов Крыма (Боровская и др., 2005).

В центральной части Черного моря можно выделить относительно широкую зонально-ориентированную область повышенных значений ПГТ (рис. 2, *и–м*; рис. 3, *ж*), которая согласно (Артамонов и др., 2005) была названа **Фронтальной зоной глубоководной части Черного моря** (ФЗГЧМ). На распределениях МГТ эта зона проявляется в виде широкой полосы положительных значений МГТ примерно между  $42.5^\circ$  и  $43.5^\circ$  с.ш. (рис. 7). Наиболее четко эта зона проявляется с сентября по январь, когда охлаждение поверхностных вод в северной части моря происходит быстрее, чем в южной. Максимальные значения МГТ ( $\sim 0.1–0.15$ ) наблюдаются в ноябре–декабре. Меридиональная структура ФЗГЧМ имеет сложный характер с несколькими максимумами. При этом широтное положение и интенсивность этих экстремумов от месяца к месяцу заметно изменяются, поэтому в пределах ФЗГЧМ сложно выделить отдельный фронт и какие-либо его ветви. Анализ поля ТПМ и распределений ЗГТ показал, что ФЗГЧМ восточнее примерно  $37^\circ$  в.д. разворачивается в меридиональном направлении. Это проявляется в виде широкой зоны повышенных положительных значений ЗГТ (до 0.1), наиболее интенсивных с сентября по декабрь (рис. 5, *в*). Этот квазимеридиональный участок ФЗГЧМ отделяет холодные воды центральной части моря от более теплых вод его юго-восточной части.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе современного массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением исследована структура и сезонная изменчивость температурных фронтов Черного

моря. На основе анализа распределений полного градиентов температуры были выделены следующие основные фронтальные зоны: Западная, Турецкая прибрежная, Фронтальная зона Анатолийского апвеллинга, Юго-восточная прибрежная, Северо-восточная, Крымская, Керченско-Феодосийская, Фронтальная зона глубоководной части Черного моря. По распределениям меридионального и зонального градиентов температуры в пределах наиболее интенсивных фронтальных зон выделен ряд крупномасштабных фронтов: Западный фронт и его Прибрежная ветвь, Фронт Анатолийского апвеллинга, Северо-восточный фронт, Крымский фронт, Керченско-Феодосийский фронт.

Показано, что формирование фронтальных зон и климатических фронтов происходит под влиянием разных факторов. Это, прежде всего, крупномасштабные процессы прогрева и выхолаживания вод, их адвекция Основным черноморским течением, орография бассейна. На фоне этих крупномасштабных процессов развиваются региональные явления, такие как сток рек, поступление вод Азовского моря через Керченский пролив, развитие Анатолийского апвеллинга и апвеллингов у берегов Крыма, формирование в прибрежной зоне многочисленных квазистационарных антициклонических вихрей и вдольбереговых течений.

Показано, что вследствие взаимодействия прибрежных шельфовых вод с водами разных типов, во внутригодовом ходе интенсивности градиентов могут наблюдаться несколько максимумов или происходить смена знака градиента. Так, Прибрежная ветвь Западного фронта между м. Мидия и м. Калиакра с декабря по март формируется при взаимодействии холодных зимних прибрежных вод и менее охлажденных вод, располагающихся на шельфе над большими глубинами; с мая по август – в результате взаимодействия прибрежных вод с более теплыми Дунайскими водами, поступающими с севера; в сентябре–ноябре ПрВЗФ отделяет охлаждающиеся на мелководье прибрежные воды от более теплых вод, проникающих с юга из прибосфорского района. Вследствие этого ПрВЗФ обостряется три раза в год – в июне, в ноябре и феврале. В центральной части Анатолийского побережья прибрежный экстремум положительных МГТ в пределах ТПрФЗ усиливается два раза в год – в апреле и октябре. С октября по февраль экстремум образуется в результате взаимодействия проникающих сюда вдоль берега с востока теплых вод с более холодными водами, располагающимися мористее; в апреле–мае – при взаимодействии теплых вод, образующихся на относительно широком шельфе в результате весеннего прогрева, и более холодных апвеллинговых вод, наблюдающихся в эти месяцы над свалом глубин. В бухте Самсун прибрежный экстремум МГТ в течение года два раза изменяет знак.

Отрицательные значения МГТ здесь отмечаются в мае-июне, когда максимально влияние холодного стока р. Ешиль-Ирмак, и в ноябре-декабре, когда в бухте происходит сезонное охлаждение прибрежных вод. Высокие положительные значения МГТ наблюдаются в январе и июле-августе и связаны с затокот теплых вод с востока зимой и интенсивным прогревом прибрежных вод летом.

Установлено, что усиление контрастов между теплыми водами, переносимыми ОЧТ, и более холодными прибрежными водами в северной части моря приводит к тому, что Западный, Крымский и Керченско-Феодосийский фронт усиливаются преимущественно в зимний период, Северо-восточный фронт – в конце осени. У южных берегов моря интенсивное весеннее половодье сопровождается усилением Турецкой и Юго-восточной прибрежных зон. Фронт Анатолийского апвеллинга наиболее обострен в конце весны-летом, в период максимального развития апвеллинга и интенсивного прогрева вод в восточной части моря.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ по теме № 0827-2019-0003 “Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Скрипалева Е.А.* Особенности изменчивости гидрологических и биооптических характеристик на поверхности Черного моря по данным спутниковых и контактных измерений // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 88–115. (357 с.).
- Артамонов Ю.В., Колмак Р.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В.* Изменчивость поля температуры и температурных фронтов в северо-западной части Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 237–245.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А.* Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 62–75.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А.* Сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов восточной части Тихого океана по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 4. С. 45–61.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Бабий М.В.* Сезонная изменчивость температурных фронтов на поверхности Черного моря по спутниковым данным // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. С. 234–236.
- Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В.* Атлас температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986–2002 гг. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. 265 с.
- Боровская Р.В., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О., Лексикова Л.А., Кириллова М.В.* Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 42–48.
- Вылканов А., Данов Х., Маринов Х., Владев П.* Черное море / Пер. с болг. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 408 с.
- Газетов Е.И., Андрианова О.Р., Мединец В.И., Белевич Р.Р., Морозов В.Н.* Оценка влияния стока реки Дунай на отдельные гидрологические характеристики северо-западной части Черного моря в 2004–2013 гг. // Вестник Одесского Национального университета. Географические и геологические науки. 2015. Т. 20. Вып. 4. С. 22–34.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 67–76.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 3–14.
- Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
- Казьмин А.С.* Устойчивые термические фронты в Черном море: существование, изменчивость и связь с атмосферным воздействием // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 364–369.
- Монин А.С.* Гидродинамика атмосферы океана и земных недр. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 524 с.
- Решетников В.И.* Сток рек Турции в Черное море // Метеорология и Гидрология. 1984. № 11. С. 114–117.
- Тужилкин В.С.* Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования: Дис. доктор географических наук: 25.00.28. М., 2008. 313 с.
- Algan O., Gazioglu C., Yucel Z., Cagatay N., Gonencgil B.* Sediment and Freshwater Discharges of the Anatolian River into the Black Sea // IOC-BSRC Workshop “Black Sea Fluxes”. Workshop Report No. 145. Paris: UNESCO, 2000. P. 38–50.
- Capet A., Barth A., Beckers J.-M., Marilaure G.* Interannual variability of Black Sea’s hydrodynamics and connection to atmospheric patterns // Deep-Sea Research. 2012. Part II. 77–80. P. 128–142.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* (a) Sea surface temperature variability // The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 255–276.
- Ginzburg A.I., Zatsepin A.G., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* (b) Mesoscale water dynamics // The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 196–215.



*Kazmin A.S., Zatsepin A.G.* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *J. of Marine Systems*. 2007. V. 68. P. 293–301.

*Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. C4. 3122.

<https://doi.org/10.1029/2002JC001508>

*Nardelli B.B., Colella S., Santoleri R., Guarracino M., Kholod A.* A re-analysis of Black Sea surface temperature // *J. of Marine Systems*. 2010. V. 79. Iss. 1–2. P. 50–64.

<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.07.001>

*Nardelli B.B., Tronconi C., Pisano A., Santoleri R.* High and Ultra-High resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project // *Remote Sensing of Envi-*

*ronment*. 2013. 129:1–16.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.012>

*Oguz T., Latun V.S., Latif M.A., Vladimirov V., Su H., Markov A., Ozsoy E., Kotovshchikov B., Ereemeev V., Unluata U.* Circulation in surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Research*. 1993. V. 40. № 8. P. 1597–1612.

*Tuzhilkin V.S.* Thermohaline Structure of the Sea // *The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 217–253.

*Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.-M.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C8. P. 3246–3272.

<https://doi.org/10.1029/2002JC001390>

## Seasonal Variability of Temperature Fronts in the Black Sea by Satellite Data

Yu. V. Artamonov<sup>1</sup>, E. A. Skripaleva<sup>1</sup>, R. V. Kolmak<sup>1</sup>, and A. V. Fedirko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical institute RAS, Sevastopol, Russia*

The structure and seasonal variability of temperature frontal zones and fronts of the Black sea are investigated on the basis of the modern high resolution SST satellite dataset. The distributions of the full temperature gradient have been located the following frontal zones: the Western frontal zone, Turkish coastal frontal zone, Anatolian upwelling frontal zone, South-Eastern coastal frontal zone, North-Eastern, Crimea and Kerch-Feodosiya frontal zones, the Frontal zone of the Black sea deep part. Based on the analysis of distributions of meridional and zonal temperature gradients the large-scale fronts were identified within most frontal zones. It is shown that the combined influence of large-scale processes (seasonal heating and cooling of waters, their advection by the Rim Current) and regional factors (river discharge, coastline configuration, shelf width, development of upwelling, formation of coastal eddies) leads to significant spatial-temporal variability of the temperature field and, as a consequence, frontal zones and fronts. It is established that the majority of fronts are existed within several months. In the Northern part of the sea, the fronts are intensified mainly in winter by increasing the contrasts between warm waters carried by Rim Current and colder coastal waters. At the southern coast of the sea a frontal zones are intensified basically in late spring – summer, during the spring flood, the development of Anatolian upwelling and intensive heating of waters in the Eastern part of the sea.

**Keywords:** Black sea, satellite data, sea surface temperature, hydrological front, horizontal temperature gradient, seasonal variability, bottom relief, upwelling, Rim Current

### REFERENCES

*Algan O., Gazioglu C., Yucel Z., Cagatay N., Gonencgil B.* Sediment and Freshwater Discharges of the Anatolian River into the Black Sea // *IOC-BSRC Workshop “Black Sea Fluxes”*. Workshop Report № 145. Paris: UNESCO, 2000. P. 38–50.

*Artamonov Yu.V., Belokopytov V.N., Skripaleva E.A.* Osobnosti izmenchivosti gidrologicheskikh i bioopticheskikh karakteristik na poverhnosti Chernogo morya po dannym sputnikovyyh i kontaktnyyh izmereniy [The features of variability of hydrological and biooptical characteristics on the Black Sea surface according to satellite and contact measurements] // *Ustoichivost' i evolyutsiya okeanologicheskikh karakteristik ekosistemy Chernogo moray* / Eds. V.N. Yeremeyev, S.K. Konovalov. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2012. P. 88–115. (357 p.) (In Russian).

*Artamonov Yu.V., Kolmak R.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V.* Izmenchivost' polya temperatury i temperaturnyyh frontov v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya po sputnikovym

dannym [Variability of the temperature field and temperature fronts in the northwest Black Sea inferred from satellite data] // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. V. 14. № 3. P. 237–245. doi 10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245 (In Russian).

*Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A.* Struktura i sezonnaya izmenchivost' krupnomasshtabnyh frontov Atlanticheskogo okeana po sputnikovym dannym [Structure and seasonal variability of large-scale fronts of the Atlantic ocean from satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005. № 4. P. 62–75 (In Russian).

*Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A.* Sezonnaya izmenchivost' krupnomasshtabnyh frontov vostochnoy chasti Tihogo okeana po sputnikovym dannym [Seasonal variability of large-scale fronts of the Eastern Pacific ocean from satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008. № 4. P. 45–61 (In Russian).

*Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Babiy M.V.* Sezonnaya izmenchivost' temperaturnyyh frontov na poverhnosti Cher-

- nogo morya po sputnikovym dannym [Seasonal variability of surface temperature fronts in Black Sea by satellite data] // *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2005. P. 234–236 (In Russian).
- Babiy M.V., Bukatov A.E., Stanichny S.V.* Atlas temperatury poverhnosti Chernogo morya po sputnikovym dannym 1986–2002 gg. [Atlas of the Black Sea surface temperature from satellite data 1986–2002]. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2005. 265 p. (In Russian).
- Borovskaya R.V., Panov B.N., Spiridonova E.O., Leksikova L.A., Kirillova M.V.* Pribrezhny chernomorskiy apvellin i mezhgodovaya izmenchivost' ego intensivnosti [Coastal Black Sea upwelling and interannual variability of its intensity] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2005. Iss. 12. P. 42–48 (In Russian).
- Capet A., Barth A., Beckers J.-M., Marilaure G.* Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns // *Deep-Sea Research*. 2012. Part II. 77–80. P. 128–142.
- Gazetov E.I., Andrianova O.R., Medinec V.I., Belevich R.R., Morozov V.N.* Otsenka vliyaniya stoka reki Dunay na ot-del'nye gidrologicheskie harakteristiki severo-zapadnoy chasti Chernogo morya v 2004–2013 gg. [Assessment of the Danube river influence on some hydrological characteristics of the northwestern Black Sea in 2004–2013] // *Vestnik Odesskogo Nacional'nogo universiteta. Geograficheskie i geologicheskie nauki*. 2015. V. 20. Iss. 4. P. 22–34 (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* (a) Sea surface temperature variability // *The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 255–276.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Solov'ev D.M., Stanichny S.V.* Evolyuciya anticiklonicheskikh vihrey v severo-zapadnoy chasti Chernogo moray [The evolution of anticyclonic eddies in the northwestern part of the Black Sea] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1996. № 4. P. 67–76 (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Solov'ev D.M., Stanichny S.V.* Evolyuciya vihrey i struy v severo-vostochnoy chasti Chernogo morya (sputnikovye nablyudeniya) [The evolution of eddies and jets in the northeastern Black Sea (satellite observations)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2000. № 1. P. 3–14 (In Russian).
- Ginzburg A.I., Zatsepin A.G., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* (b) Mesoscale water dynamics // *The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 196–215.
- Ivanov V.A., Belokopytov V.N.* Okeanografiya Chernogo morya [Oceanography of Black Sea]. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2011. 209 p. (In Russian).
- Kaz'min A.S.* Ustoychivye termicheskie fronty v Chernom more: sushchestvovanie, izmenchivost' i svyaz' s atmosferynym vozdeystviem [Persistent thermal fronts in the Black Sea: existence, variability and response to atmospheric forcing] // *Okeanologiya*. 2016. V. 56. № 3. С. 364–369 (In Russian).
- Kaz'min A.S., Zatsepin A.G.* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *J. of Marine Systems*. 2007. V. 68. P. 293–301.
- Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. C4. 3122. doi: 10.1029/2002JC001508
- Monin A.S.* Gidrodinamika atmosfery, okeana i zemnyh ne-dr [Hydrodynamics of the Atmosphere, Ocean and Earth's Interior]. S-Pb.: Gidrometeoizdat, 1999. 524 p. (In Russian).
- Nardelli B.B., Colella S., Santoleri R., Guarracino M., Kholod A.* A re-analysis of Black Sea surface temperature // *J. of Marine Systems*. 2010. V. 79. Iss. 1–2. P. 50–64. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.07.001
- Nardelli B.B., Tronconi C., Pisano A., Santoleri R.* High and Ultra-High resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project // *Remote Sensing of Environment*. 2013. 129:1–16. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.012
- Oguz T., Latun V.S., Latif M.A., Vladimirov V., Su H., Markov A., Ozsoy E., Kotovshchikov B., Eremeev V., Unluata U.* Circulation in surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Research*. 1993. V. 40. № 8. P. 1597–1612.
- Reshetnikov V.I.* Stok rek Turcii v Chernoe more [Turkish rivers discharge into the Black Sea] // *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1984. № 11. С. 114–117 (In Russian).
- Tuzhilkin V.S.* Sezonnaya i mnooletnyaya izmenchivost' termohalinnoy struktury vod Chernogo i Kaspiyskogo morey i protsessy ee formirovaniya: Diss. doktor geograficheskikh nauk [Seasonal and long-term variability of thermohaline waters structures of the Black and Caspian Seas and processes of its formation. Dr. geogr. sci. Thesis], Moscow, 2008. 313 p. (In Russian).
- Tuzhilkin V.S.* Thermohaline Structure of the Sea // *The Black Sea Environment / The Handbook of Environmental Chemistry*. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 217–253.
- Vylkanov A., Danov H., Marinov H., Vladov P.* Chernoe more [Black Sea] / Transl. from Bulg. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 408 p. (In Russian).
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.-M.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. No. C8. P. 3246–3272. doi: 10.1029/2002JC001390.