

## Изменчивость поля температуры и температурных фронтов в северо-западной части Черного моря по спутниковым данным

Ю.В. Артамонов, Р.В. Колмак, Е.А. Скрипалева, А.В. Федирко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: artam-ant@yandex.ru*

На основе современного массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением исследованы особенности изменчивости поля температуры и температурных фронтов на поверхности в северо-западной части Черного моря. Выявлены отдельные ветви Северо-западной фронтальной зоны – Прибрежная, Центральная и Южная. Определены основные закономерности климатического внутригодового цикла характеристик фронтов. Показано, что фронты наиболее четко выражены в зимний период, когда отмечается минимальный уровень синоптической изменчивости температуры на поверхности моря (ТПМ). В конце весны, когда происходит резкое повышение уровня синоптической изменчивости ТПМ, интенсивность фронтов существенно ослабевает. Летом фронтальная система практически полностью размывается. Выявлена тенденция к запаздыванию времени наступления максимума интенсивности фронтов в южном направлении примерно на 1-2 месяца. Прибрежная ветвь наиболее обострена с ноября по январь, Центральная – в январе и Южная – в феврале-марте. Проанализирована качественная связь положения фронтов с донной топографией. Показано, что для каждой ветви Северо-западной фронтальной зоны характерен свой диапазон глубин, над которыми она располагается в течение года. Для Прибрежной ветви он составляет 10–20 м, для Центральной – 20–40 м, для Южной – 45–80 м.

**Ключевые слова:** Черное море, северо-западный шельф, спутниковые данные, температура поверхности моря, гидрологический фронт, градиент температуры, сезонная изменчивость, синоптическая изменчивость, рельеф дна

*Одобрена к печати: 03.04.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245*

### Введение

В настоящее время существует 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., 2008; Иванов, Белокопытов, 2011; Capet et al., 2012; Артамонов и др., 2012). Вместе с тем границы между разными термохалинными структурами, проявляющиеся в виде фронтальных разделов, для Черного моря изучены крайне слабо. В работе (Бабий и др., 2005) приводятся среднемесячные карты градиентов температуры поверхности моря (ТПМ), однако с позиции фронтогенеза эти результаты не обсуждаются. В монографии (Иванов, Белокопытов, 2011) упоминается о существовании крупномасштабных температурных фронтов в поверхностном слое над северо-западным шельфом, в восточной части моря и у Анатолийского побережья. При этом отмечается, что они подвержены значительной изменчивости, хотя закономерности этой изменчивости не рассматриваются. Анализ спутниковых данных за период 1986–2002 гг. показал, что пространственная структура крупномасштабных фронтальных зон неоднородна и в их широких пределах можно выделить несколько фронтальных разделов. Так, на среднегодовых распределениях меридиональных градиентов температуры через центральную часть северо-западного шельфа выделяются по крайней мере три фронта, интерпретируемых как отдельные ветви общего Северо-западного фронтального

раздела (Артамонов и др., 2005). По спутниковым данным показано, что характеристики температурных фронтов на поверхности Черного моря подвержены существенным сезонным и межгодовым колебаниям (Артамонов и др., 2005; Артамонов, Скрипалева, 2008).

Настоящая работа является продолжением исследований изменчивости ТПМ и структуры фронтов на основе наиболее полного массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением. Уточняются закономерности внутригодового цикла характеристик фронтов над северо-западным шельфом Черного моря, анализируется их связь с рельефом дна.

### Материалы и методика

В работе использованы данные спутниковых измерений ТПМ за период с января 1982 г. по декабрь 2015 г. со среднесуточным осреднением в узлах сетки  $0,04^\circ \times 0,04^\circ$  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)) и массив донной топографии (<http://www.gebco.net>) с пространственным разрешением 30 arc-seconds ( $\sim 1$  км).

Для анализа изменчивости ТПМ в каждом узле сетки рассчитывались ее синоптические и сезонные среднеквадратические отклонения (СКО). Синоптические СКО ТПМ вычислялись по среднесуточным рядам для каждого месяца каждого года и далее осреднялись за 34 года для января, февраля и т. д. (среднемесячные  $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ) и за все 409 месяцев (среднедолголетнее  $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ). По среднесуточным значениям ТПМ были получены временные ряды ее среднемесячных значений, по которым рассчитывались внутригодовые СКО для каждого года, которые затем осреднялись за 34 года ( $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ).

Учитывая, что в центральной части северо-западного шельфа изотермы ориентированы квазизонально, фронты выделялись по экстремумам меридиональных градиентов температуры (МГТ). Величины МГТ (в  $^\circ\text{C}/0,04^\circ\text{lat}$ ) вычислялись между соседними узлами исходной сетки с шагом, составляющим  $0,04^\circ$  по широте, при этом использовались среднемесячные климатические значения ТПМ, полученные по ее среднемесячным значениям для каждого года и далее помесячно осредненные за период 1982–2015 гг. В результате осреднения за 34 года мезомасштабные шумы в анализируемых полях практически не проявлялись. Для подавления пространственного шума профили МГТ были дополнительно сглажены скользящим пятиточечным фильтром по пяти узлам сетки. Идентификация фронтов проводилась по диапазону температуры, соответствующему данному экстремуму, диапазону глубин, знаку меридионального градиента и широтному положению экстремума. Положительное значение МГТ показывает повышение температуры в направлении с севера на юг.

## Анализ результатов

Среднемесячные распределения ТПМ в северо-западной части Черного моря показали значительную пространственно-временную неоднородность поля температуры. Зоны сгущения и разряжения изотерм особенно ярко выражены в зимние месяцы (рис. 1а).

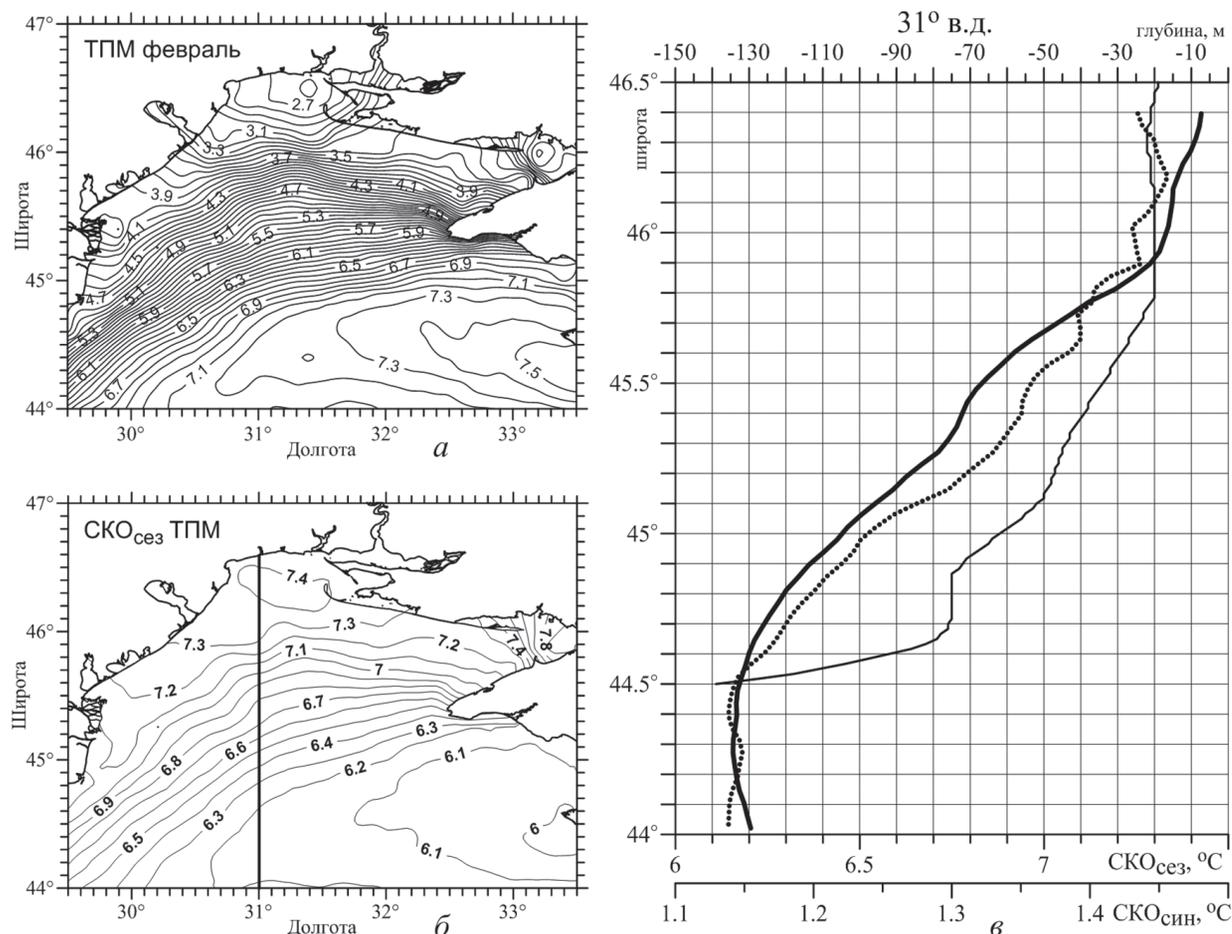


Рис. 1. Распределения: а) ТПМ в феврале; б) СКО<sub>сез</sub> ТПМ в северо-западной части Черного моря; в) СКО<sub>сез</sub> (жирная сплошная кривая), СКО<sub>син</sub> (пунктир) и профиля дна до глубины 150 м (тонкая кривая) вдоль 31° в. д.

Из распределений характеристик среднесезонной и синоптической изменчивости ТПМ видно, что максимальные значения СКО<sub>сез</sub> и СКО<sub>син</sub> отмечаются в прибрежной зоне над глубинами менее 25 м (рис. 1б, в). Над глубинами более 25 м наблюдается резкое понижение уровней обоих типов изменчивости в южном направлении, которое продолжается до свала глубин 110–120 м. Непосредственно над свалом глубин наблюдаются минимумы значений СКО<sub>сез</sub> и СКО<sub>син</sub>. На фоне общей тенденции уменьшения значений СКО<sub>сез</sub> и СКО<sub>син</sub> с севера на юг наблюдаются «ступени» и слабые экстремумы (рис. 1в). Такие особенности распределений сезонного и синоптического СКО отражают разную степень изменчивости поверхностных вод по пространству.

Распределения  $СКО_{\text{син}}$  по месяцам показывают, что минимальная изменчивость ТПМ на синоптическом масштабе наблюдается в феврале–марте (рис. 2а). В апреле происходит резкое повышение уровня синоптической изменчивости, который достигает максимума в мае. В эти месяцы наблюдается заметный перепад значений  $СКО_{\text{син}}$  между мелководной прибрежной частью шельфа, где они максимальны, и более глубоководной южной частью. Максимум  $СКО_{\text{син}}$  наблюдается ближе к берегу, где прогрев поверхностных вод наиболее интенсивен. Начиная с июня, когда прогрев замедляется и воды становятся более однородными, уровень синоптической изменчивости повсеместно понижается. С августа по декабрь синоптическая изменчивость продолжает медленно уменьшаться, при этом ее широтные изменения становятся минимальными. В январе, когда процесс интенсивного осенне-зимнего выхолаживания поверхностных вод практически закончился, уровень синоптической изменчивости ТПМ резко уменьшается.

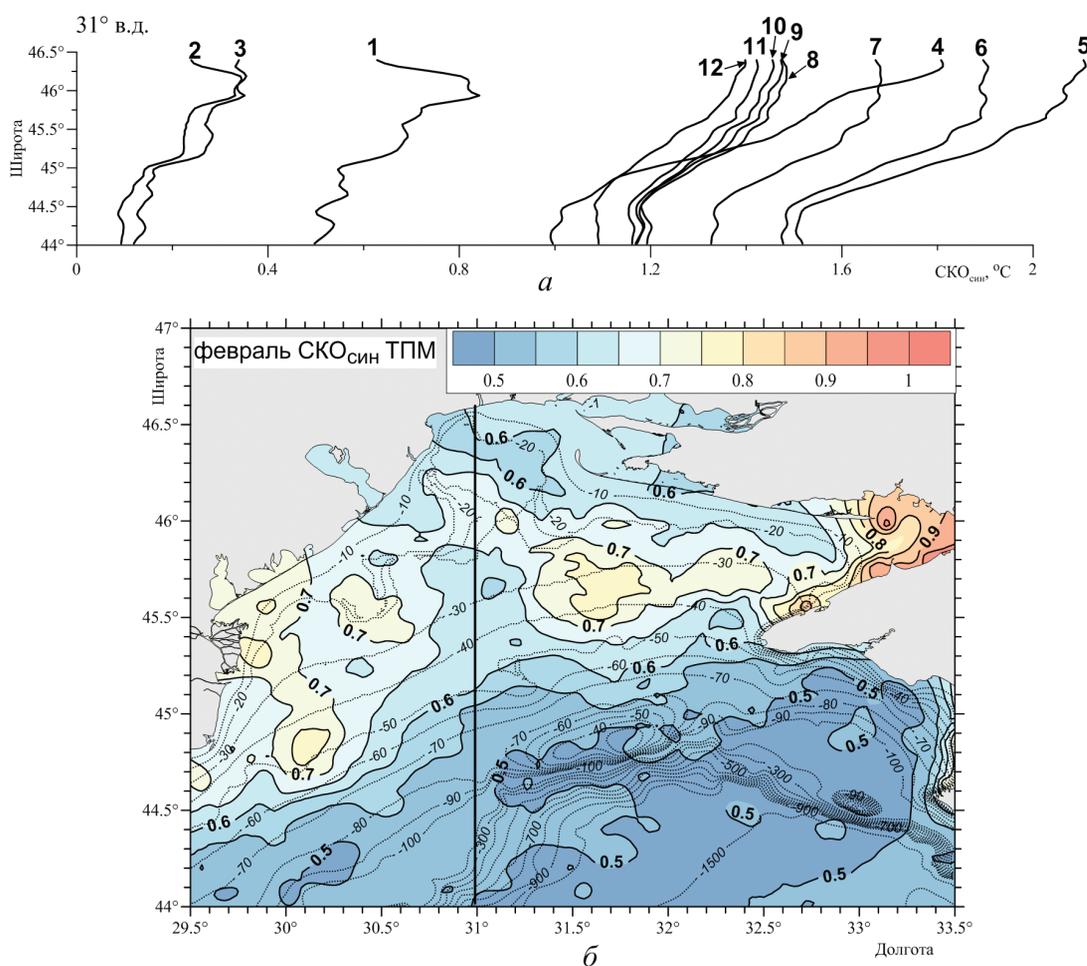


Рис. 2. а) распределения  $СКО_{\text{син}}$  по месяцам вдоль  $31^\circ$  в. д.; б) пространственное распределение  $СКО_{\text{син}}$  в феврале, тонкими линиями обозначены основные изобаты

Необходимо отметить, что в январе–марте, несмотря на минимальные значения  $СКО_{\text{син}}$ , экстремумы на профилях  $СКО_{\text{син}}$  выражены более четко, чем в другие месяцы, т. е. в период максимального охлаждения поверхностных вод над шельфом простран-

твенная неоднородность синоптической изменчивости ТПМ увеличивается. Из *рис. 2б* видно, что при общем понижении уровня синоптической изменчивости в южном направлении наблюдается чередование областей повышенной и пониженной синоптической изменчивости ТПМ. Так, в прибрежной части с глубинами до 20 м наблюдается понижение уровня синоптической изменчивости, южнее происходит рост ее уровня, особенно в Каркинитском заливе, в западной части района вблизи устья р. Дунай и в центральной части шельфа на широте  $45,5^\circ$  с. ш. Далее на юг синоптическая изменчивость вновь уменьшается.

Таким образом, анализ изменчивости ТПМ на внутригодовом масштабе выявил заметные пространственно-временные неоднородности в распределениях  $СКО_{сез}$  и  $СКО_{снн}$ . Области относительно однородных вод с низким уровнем изменчивости разделяются зонами повышенных градиентов ТПМ. Высокоградиентные зоны хорошо прослеживаются на среднегодовых меридиональных профилях МГТ, при этом их количество и положение изменяется в зависимости от долготы (*рис. 3а*). В западной части района ( $29,5^\circ$  и  $30^\circ$  в. д.) отмечаются одна и две зоны повышенных МГТ соответственно, в центральной части ( $30,5-32^\circ$  в. д.) четко прослеживаются три зоны, на востоке ( $33^\circ$  в. д.) – две. В общем случае выделены три основных фронтальных раздела, которые названы ветвями общего Северо-западного фронта (СЗФ) – Прибрежной (ПрВСЗФ), Центральной (ЦВСЗФ) и Южной (ЮВСЗФ) (*рис. 3*).

Сопоставление среднегодовых распределений МГТ с профилем дна показало, что каждой из трех выделенных фронтальных зон соответствует определенный диапазон глубин – соответственно 10–20 м, 20–40 м и 45–80 м. При этом максимум МГТ во фронтальной зоне, соответствующий оси фронта, обычно располагается над участками, где наблюдается относительно резкое изменение глубины (*рис. 3б*).

Анализ распределений градиентов по месяцам указывает на наличие существенных сезонных вариаций характеристик фронтов. Например, Прибрежная ветвь СЗФ вдоль  $31^\circ$  в. д. (*рис. 4а, б*) хорошо прослеживается в январе–марте между  $46,15-46,25^\circ$  с. ш. над глубинами 18–20 м. В апреле–мае, когда происходит интенсивный прогрев прибрежных вод, ПрВСЗФ размывается, а МГТ становятся отрицательными. В июне, когда наиболее интенсивный прогрев закончился, фронт снова появляется около  $46,5^\circ$  с. ш. над глубинами 12–14 м. С июля по декабрь ПрВСЗФ медленно смещается к югу до  $46,25^\circ$  с. ш., прослеживаясь над глубинами 14–20 м, и заметно усиливается. Максимальные значения МГТ во фронте ( $0,12-0,13^\circ\text{C}/0,04^\circ\text{lat}$ ) отмечаются с ноября по январь. Температура на оси фронта в течение года изменяется от  $23,5^\circ\text{C}$  в августе до  $3,8^\circ\text{C}$  в феврале.

Центральная ветвь СЗФ (*рис. 4а, б*) с января по апрель прослеживается между  $45,6^\circ$  и  $45,75^\circ$  с. ш. над глубинами 25–29 м. В мае она смещается на юг к  $45,45^\circ$  с. ш., располагается над глубиной 36 м и заметно ослабевает. В июне фронт полностью размывается. Вторичное появление ЦВСЗФ наблюдается в июле, когда она формируется севернее ( $45,85^\circ$  с. ш.) и проходит над глубиной примерно 22 м. С августа по декабрь ЦВСЗФ постепенно усиливается и смещается на юг от  $46^\circ$  с. ш. в августе–сентябре до  $45,75^\circ$  с. ш.

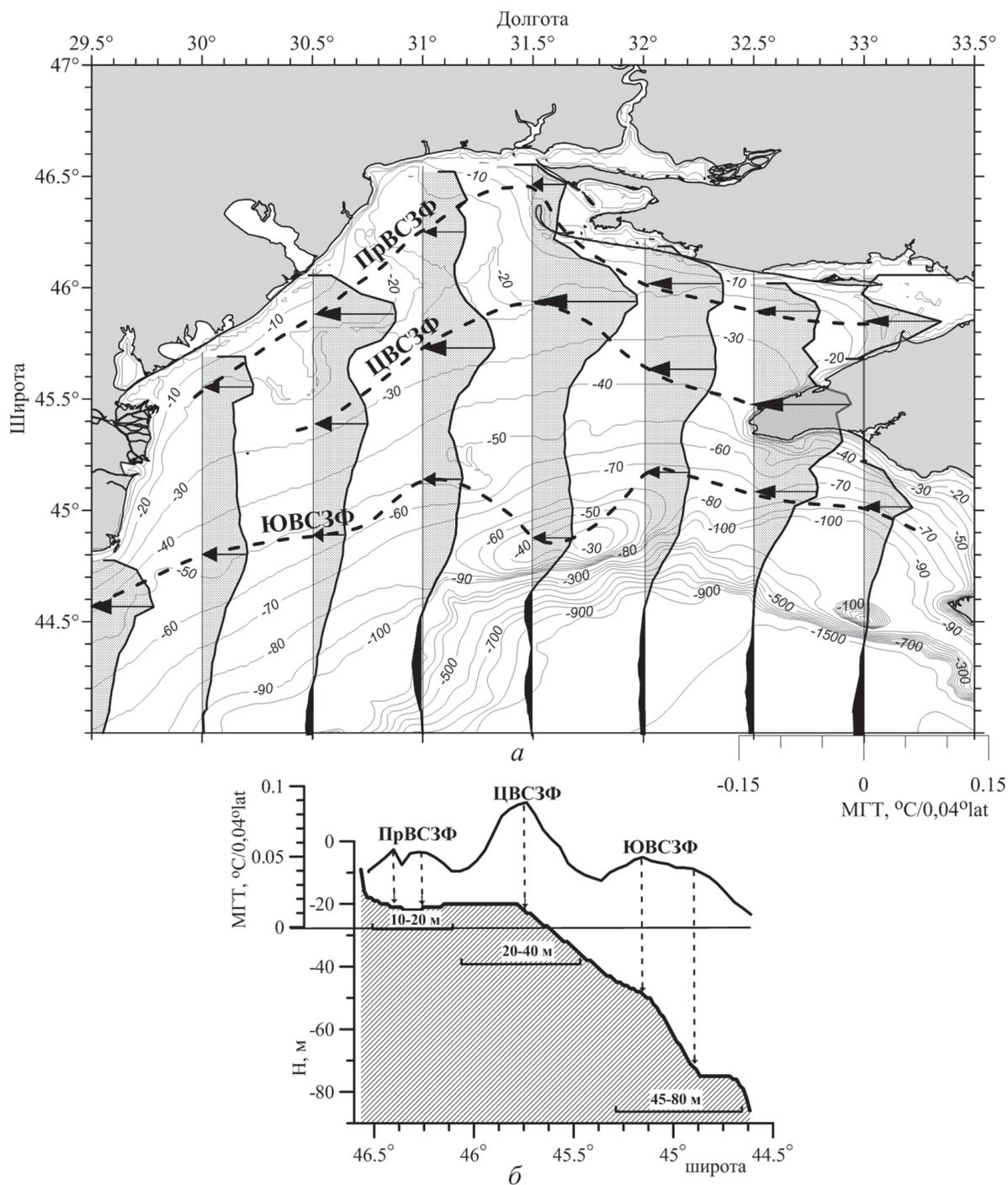


Рис. 3. а) распределения среднегодовых МГТ вдоль меридиональных профилей и схематичное положение основных фронтов (штриховые линии), стрелками отмечено широтное положение максимумов МГТ; б) распределение МГТ на фоне профиля дна (заштрихован) и диапазоны глубин, над которыми формируются зоны повышенных МГТ вдоль 31° в. д.

в декабре. В этот период фронт располагается над глубинами 20–25 м. Максимальное обострение ЦВСЗФ (МГТ ~ 0,25 °C/0,04°lat) отмечается в январе. Температура на оси фронта в течение года изменяется от 23,9 °C в августе до 4,5 °C в январе.

Южная ветвь СЗФ (рис. 4а, в) проявляется в течение всего года, располагаясь над глубинами 45–75 м. В некоторые месяцы (декабрь, январь, сентябрь) севернее ЮВСЗФ

наблюдаются вторичные максимумы МГТ (отмечены штриховыми линиями на рис. 4а), происхождение которых пока не совсем понятно. Как и другие ветви СЗФ, ЮВСЗФ наиболее интенсивна с конца осени до начала весны (ноябрь–март). В это время она располагается между 44,8° и 45,15° с. ш. В середине года ЮВСЗФ заметно ослабевает и смещается к северу к 45,25° с. ш. Максимальные значения МГТ (0,13–0,14 °C/0,04°lat) наблюдаются в феврале–марте. Температура на оси фронта изменяется от 24,2 °C в августе до 6 °C в марте.

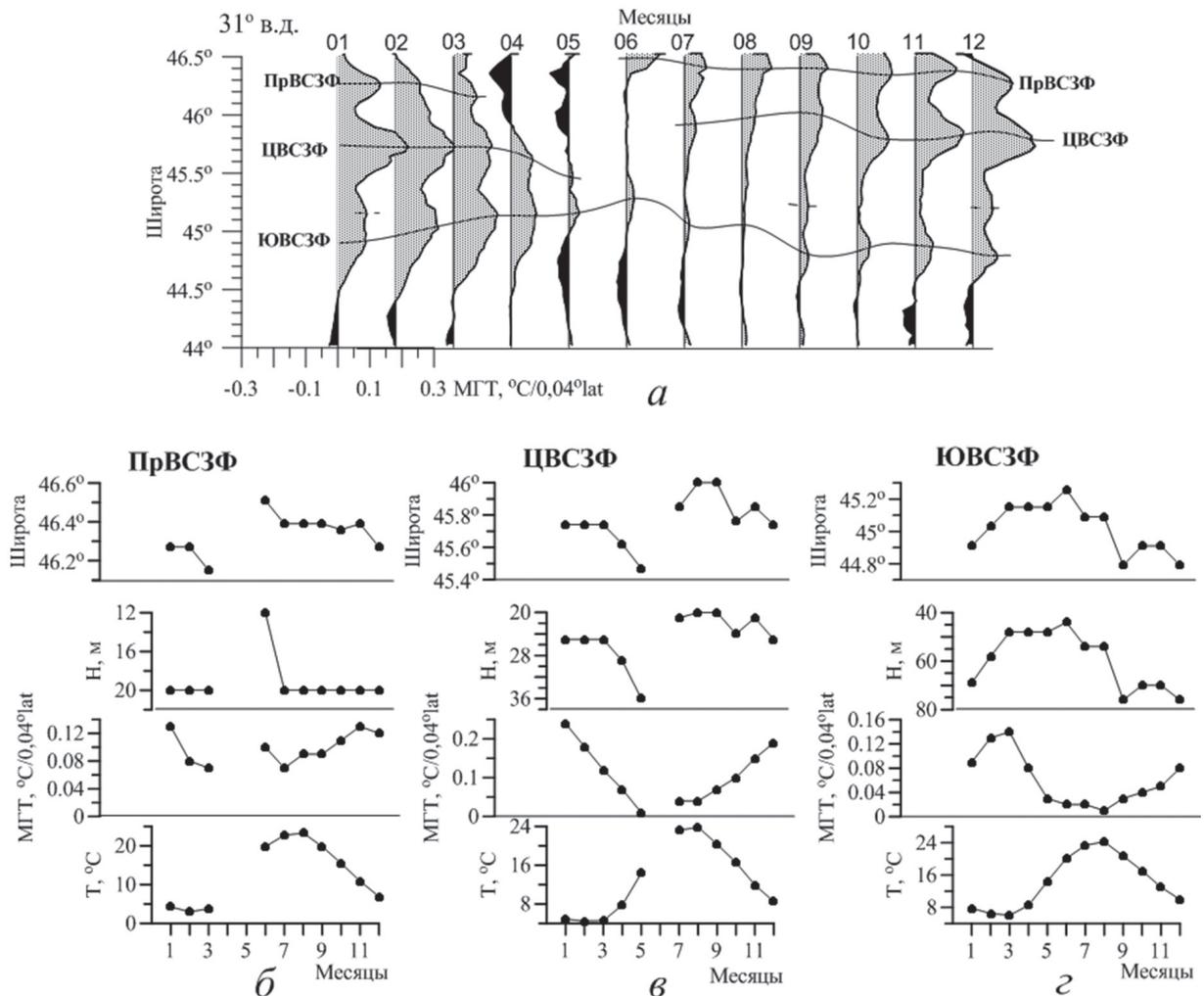


Рис. 4. а) широтно-временные распределения МГТ и положение основных фронтов (сплошные кривые), б–г) графики внутригодового цикла характеристик ПрВСЗФ (б), ЦВСЗФ (в) и ЮВСЗФ (г) на 31° в. д.

Отметим, что наблюдается тенденция к запаздыванию наступления максимума интенсивности фронтов и периодов их ослабления в южном направлении примерно на 1–2 месяца. Максимальное обострение ПрВСЗФ происходит в ноябре–январе, ЦВСЗФ – в январе и ЮВСЗФ – в феврале–марте. ПрВСЗФ практически полностью размывается в апреле–мае, ЦВСЗФ – в июне, ЮВСЗФ – в августе. Эта особенность наблюдается и на других меридианах.

## Заключение

На основе современных спутниковых данных показано, что над северо-западным шельфом Черного моря максимальный уровень сезонной и синоптической изменчивости ТПМ отмечается в прибрежной зоне. Мористее наблюдается понижение уровней обоих типов изменчивости в южном направлении. Выявлены заметные пространственно-временные неоднородности в распределении уровня синоптической изменчивости ТПМ. Ее минимум наблюдается в феврале–марте, в апреле она резко возрастает, достигая максимума в мае. Показано, что области относительно однородных вод с низким уровнем изменчивости, разделяемые зонами повышенных градиентов ТПМ, наиболее четко выражены в зимний период.

Были выделены три отдельные ветви Северо-западной фронтальной зоны – Прибрежная, Центральная и Южная. Эти ветви наиболее обострены в зимний период, когда отмечается минимальный уровень синоптической изменчивости ТПМ. В апреле–мае, когда происходит резкое повышение уровня синоптической изменчивости ТПМ, интенсивность фронтов существенно ослабевает. Летом, когда поверхностные воды наиболее прогреты и относительно однородны, фронты могут полностью размываться.

Выявлено запаздывание наступления максимума интенсивности фронтов в южном направлении примерно на 1–2 месяца – ноябрь–январь для ПрВСЗФ, январь для ЦВСЗФ и февраль–март для ЮВСЗФ. Для каждой ветви Северо-западной фронтальной зоны характерен свой диапазон глубин, над которыми они располагается в течение года. Для ПрВСЗФ он составляет 10–20 м, для ЦВСЗФ – 20–40 м, для ЮВСЗФ – 45–80 м.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов».

## Литература

1. 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. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 88–115.
2. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А. Межгодовая изменчивость температурных фронтов на поверхности Черного моря по спутниковым данным // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 212–215.
3. 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.
4. 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.
5. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
6. Тужилкин В.С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования: дисс. докт. геогр. наук. М., 2008. 313 с.
7. 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.

8. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability // The Black Sea Environment (Hdb. Env. Chem. Vol. 5, Part Q (2008): DOI 10.1007/698\_5\_090). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 255–276.
9. 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 // Journal of Marine Systems, 2007. Vol. 68. P. 293–301.

## Variability of the temperature field and temperature fronts in the northwest Black Sea inferred from satellite data

Yu.V. Artamonov, R.V. Kolmak, E.A. Skripaleva, A.V. Fedirko

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*  
E-mail: artam-ant@yandex.ru

The features of variability of sea surface temperature (SST) and temperature fronts in the northwest part of the Black Sea are investigated using the modern high spatial-temporal resolution SST satellite data. Separate branches of the Northwest frontal zone – the Coastal, Central and Southern ones – are revealed. Basic regularities of a climatic intraannual cycle of the fronts' characteristics are defined. It is shown that the fronts are most clearly expressed in a winter season when the level of SST synoptic variability is minimal. In late spring, when the level of SST synoptic variability increases sharply, the fronts' intensity weakens greatly. In summer, the frontal system almost completely vanishes. The tendency of time delay of the fronts' intensity maximum in the southern direction is revealed to be 1-2 months. The Coastal branch is most intensive from November till January, the Central – in January and the Southern – in February–March. Qualitative relation between the fronts' position and the bottom topography is analyzed. It is shown that each branch of the Northwest frontal zone is characterized by depths range over which it is located during the year. For the Coastal branch it is 10–20 m, for the Central – 20–40 m and for the Southern – 45–80 m.

**Keywords:** Black Sea, northwest shelf, satellite data, sea surface temperature, hydrological front, temperature gradient, seasonal variability, synoptic variability, bottom relief

*Accepted: 03.04.2017*

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245

### References

1. Artamonov Yu.V., Belokopytov V.N., Skripaleva E.A., Osobennosti izmenchivosti gidrologicheskikh i bioopticheskikh kharakteristik na poverkhnosti Chernogo morya po dannym sputnikovyykh i kontaktnyykh izmerenii (The features of variability of hydrological and biooptical characteristics on the Black Sea surface according to satellite and contact measurements), In: *Ustoichivost' i evolyutsiya okeanologicheskikh kharakteristik ekosistemy Chernogo morya* (Stability and evolution of oceanologic characteristics of Black Sea ecosystem), Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2012, pp. 88–115.
2. Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Mezhhodovaya izmenchivost' temperaturnyykh frontov na poverkhnosti Chernogo morya po sputnikovym dannym (Interannual variability of surface temperature fronts in Black Sea by satellite data), *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2008, pp. 212–215.
3. Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Babii M.V., Sezonnaya izmenchivost' temperaturnyykh frontov na poverkhnosti Chernogo morya po sputnikovym dannym (Seasonal variability of surface temperature fronts in Black Sea by satellite data), *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2005, pp. 234–236.
4. Babii M.V., Bukatov A.E., Stanichnyi S.V., *Atlas temperatury poverkhnosti Chernogo morya po sputnikovym dannym 1986–2002 gg.* (Atlas of Black Sea surface temperature by satellite data), Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2005, 265 p.
5. Ivanov V.A., Belokopytov V.N., *Okeanografiya Chernogo morya* (Oceanography of Black Sea), Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2011, 209 p.
6. Tuzhilkin V.S., *Sezonnaya i mnogoletnyaya izmenchivost' termokhalinnoi struktury vod Chernogo i Kaspiiskogo morei i protsessy ee formirovaniya: dis. dokt. geogr. 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.
7. 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, pp. 128–142.
8. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Sea surface temperature variability, In: *The Black Sea Environment (Hdb. Env. Chem. Vol. 5, Part Q (2008): DOI 10.1007/698\_5\_090)*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 255–276.
9. 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, *Journal of Marine Systems*, 2007, Vol. 68, pp. 293–301.