

УДК 551.465

УСТОЙЧИВЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ФРОНТЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ: СУЩЕСТВОВАНИЕ, ИЗМЕНЧИВОСТЬ И СВЯЗЬ С АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

© 2016 г. А. С. Казьмин

*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва**e-mail: akazmin@ocean.ru*

Поступила в редакцию 08.12.2014 г.

После доработки 26.03.2015 г.

На основании анализа спутниковых измерений температуры поверхности моря (ТПМ) высокого пространственного разрешения (массив PATHFINDER) документально подтверждено существование в Черном море пространственно-устойчивых (в климатическом плане) термических фронтальных зон. Такие зоны образуются зимой между сильно выхолаживающейся мелководной северо-западной частью моря и более теплыми водами глубоководной части, и весной—летом между интенсивно прогреваемыми водами юго-восточной оконечности моря и менее теплой центральной частью. Показано наличие межгодовой и квазидекадной изменчивости фронта в северо-западной части моря и высокой, статистически значимой отрицательной корреляции между его интенсивностью и среднезимней ТПМ.

DOI: 10.7868/S0030157416030114

Черное море имеет глубокую котловину с относительно простой геометрией береговой линии. Отсутствие обособленных суб-бассейнов и перепадов глубин (за исключением мелководной северо-западной части) приводит к формированию единой циркуляционной системы с интенсивным кольцевым течением (Основное черноморское течение – ОЧТ), приуроченным к области материкового склона. Большинство гидрологических фронтов в Черном море связано с мезомасштабными процессами в ОЧТ (меандрирование, вихреобразование), интенсивность которых зависит от ветрового воздействия (экмановской накачки), а также с синоптическими атмосферными процессами. Соответственно, принято считать, что в Черном море существуют, главным образом, фронты синоптического масштаба, характеризующиеся нестационарностью и высокой пространственно-временной изменчивостью [1, 3–7, 11]. В качестве примера на рис. 1 представлены карты распределения величины локального градиента температуры поверхности моря (ТПМ), полученные в Морском гидрофизическом институте Национальной Академии наук Украины (<http://dvs.net.ru/mp/data>) по данным ИСЗ MODIS-AQUA. Эти карты, построенные с интервалом в две недели, демонстрируют, насколько изменчиво распределение синоптических фронтов в Черном море. Вместе с тем, региональные климатические особенности моря (открытая для вторжений с севера холодных воздушных масс

северо-западная часть с умеренным климатом и восточная половина, находящаяся в условиях субтропиков) создают предпосылки для образования в Черном море ряда пространственно-устойчивых (в климатологическом плане) областей повышенных градиентов ТПМ, которые могут быть определены как фронтальные зоны.

Впервые существование таких зон, по-видимому, отмечено в [2]. В этой работе на основании судовых гидрологических съемок было установлено, что в зимний период в Черном море образуется фронтальная зона между сильно выхолаживающейся мелководной северо-западной частью моря и более теплыми водами глубоководной части с горизонтальными градиентами ТПМ, достигающими $2^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. Еще одна зона повышенных градиентов, ориентированная меридионально, наблюдается в восточной части Черного моря в весенне-летний период. Она разделяет наиболее интенсивно прогревающиеся воды юго-восточной оконечности моря и менее теплые воды центральной части. Градиенты ТПМ в этой зоне могут достигать $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, т.е. превышать зимние значения в северо-западной части.

Цитированные выше результаты [2] были получены на основе анализа немногочисленных судовых измерений низкого пространственного разрешения и поэтому дают лишь самое общее представление об устойчивых зонах повышенных градиентов ТПМ в Черном море. В настоящее

время имеются глобальные среднемесячные климатологические (период осреднения 1982–2008 гг.) карты ТПМ, построенные на основе регулярных спутниковых измерений высокого пространственного разрешения (4 км × 4 км; радиометр AVHRR; массив PATHFINDER) в Национальном центре океанографических данных NOAA (<http://data.nodc.noaa.gov/las/getUI.do>). Анализ этих карт дает возможность документально подтвердить существование пространственно-устойчивых фронтальных зон в Черном море и получить детальные сведения об их положении. На рис. 2 представлены среднемесячные климатологические карты, отражающие сезонную изменчивость пространственного положения устойчивых термических фронтальных зон в Черном море (построены автором путем модификации оригинальных климатологических карт распределения ТПМ). На этих иллюстрациях узкие светлые полосы соответствуют областям сгущения изотерм, маркирующим положение фронтальных зон. Обширные однородные участки (от различных оттенков серого до черных) соответствуют районам со слабыми градиентами ТПМ.

Формирование фронтальной зоны между мелководной северо-западной частью и водами глубоководной части моря начинается в декабре, максимальная интенсивность достигается в январе–феврале, а в марте происходит разрушение фронтальной зоны, полностью исчезающей в апреле. В период максимального развития фронтальная зона прослеживается далеко на юг (вплоть до Босфора) благодаря переносу холодных вод из мелководной северо-западной части вдоль узкого шельфа с прибрежным течением. Пространственное положение фронтальной зоны в целом совпадает с областью материкового склона.

В марте в районе 37° в.д. начинается формирование меридионально ориентированной фронтальной зоны между интенсивно прогревающейся юго-восточной оконечностью моря и более холодной центральной частью. Эта зона прослеживается в период с апреля по август, с максимумом интенсивности в июне.

В сентябре–октябре наблюдается еще одна зона повышенных контрастов температуры вдоль центральной части южного побережья, связанная, по-видимому, с тем, что в центральной части в этот период уже происходит интенсивное выхолаживание, а вдоль южного побережья продолжается прогрев вод. Севернее 42° с.ш. эта зона сливается с остатками северного участка меридио-

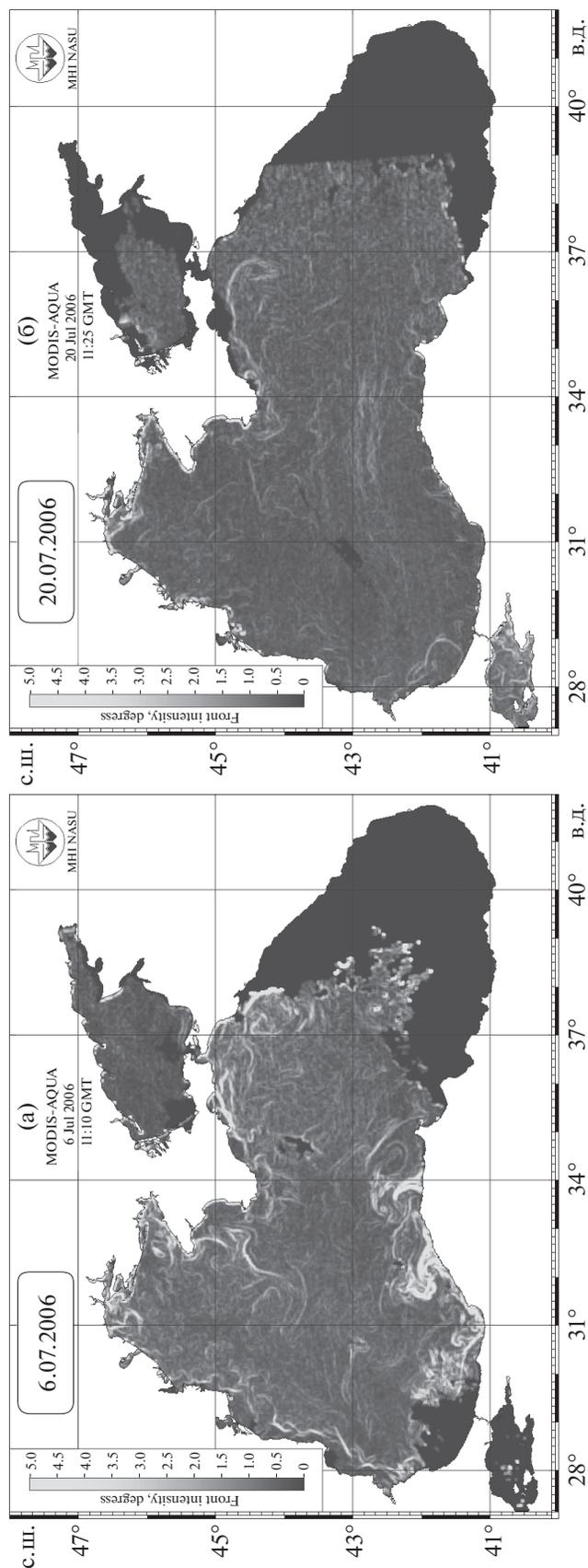


Рис. 1. Карты распределения величины локального градиента ТПМ в Черном море 6.07 (а) и 20.07 (б) 2006 г. Светлые нитеобразные структуры соответствуют областям сгущения изотерм, маркирующим положение фронтов.

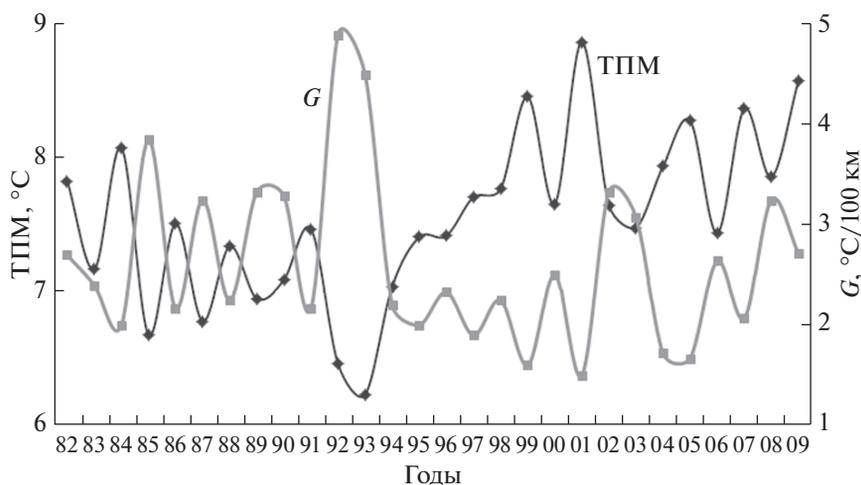


Рис. 3. Долгопериодная изменчивость максимального меридионального градиента ТПМ вдоль 31° в.д. в районе фронтальной зоны северо-западной части Черного моря в январе (G , $^\circ\text{C}/100$ км; серая линия) и осредненной по акватории среднезимней ТПМ ($^\circ\text{C}$; черная линия).

нальной фронтальной зоны, описанной выше, образуя единую структуру.

Большой интерес представляет вопрос о существовании долгопериодной изменчивости устойчивых фронтальных зон в Черном море и ее возможной связи с крупномасштабным атмосферным воздействием. Наиболее важен он в отношении фронтальной зоны северо-западной части моря, так как она отделяет высокопродуктивную мелководную часть от вод открытого моря с низкой продуктивностью и ее долгопериодная изменчивость может оказывать влияние на экосистему. Для исследования этого вопроса была рассчитана величина максимального меридионального градиента ТПМ ($G = |\partial(\text{ТПМ})/\partial y|$) вдоль 31° в.д. в районе фронтальной зоны в январе (период максимальной интенсивности фронтальной зоны) для 1982–2009 гг. по спутниковым данным (массив PATHFINDER; <http://data.nodc.noaa.gov/las/getUI.do>). Временной ряд G , представленный на рис. 3 (серая линия), подтверждает наличие как межгодовой, так и квазидекадной изменчивости интенсивности фронтальной зоны (максимумы наблюдаются в 1985, 1992–93 и 2002–04 гг.). Следует заметить, что полученное нами среднегодовое значение G ($2.63^\circ\text{C}/100$ км) превышает оценку, сделанную в [2] ($2^\circ\text{C}/100$ км), что объясняется использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения.

Косвенно оценить роль крупномасштабного атмосферного воздействия в долгопериодной изменчивости интенсивности рассматриваемой фронтальной зоны можно попытавшись обнаружить наличие связи между ней и изменчивостью осредненной по акватории среднезимней ТПМ, которая служит индикатором зимнего выхолаживания и, в свою очередь, связана с Северо-Атлан-

тическим колебанием (САК) [8, 9]. На рис. 3 (черная линия) показана временная изменчивость среднезимней ТПМ по тем же спутниковым данным (массив PATHFINDER), осредненным для центральной части моря (42° – 44° с.ш. и 29° – 39° в.д.). Расчеты подтверждают наличие высокой, статистически значимой отрицательной корреляции ($R = -0.74$, с уровнем вероятности $p < 0.01$) между интенсивностью фронта и ТПМ (рис. 4, слева). Отрицательная корреляция объясняется тем, что скорость выхолаживания определяется (наряду с интенсивностью теплоотдачи с поверхности) также глубиной проникновения зимней конвекции. Соответственно, в мелководной северо-западной части, где конвективное перемешивание достигает дна, скорость охлаждения существенно выше, чем в открытой глубоководной части моря, за счет чего и возникает перепад температуры. При усилении теплоотдачи (более суровые зимы) различие в скоростях охлаждения увеличивается, перепад температуры возрастает, а осредненная ТПМ уменьшается.

Свидетельством того, что источником изменчивости является именно атмосферное воздействие, служит высокая отрицательная корреляция ($R = -0.63$, $p < 0.01$) интенсивности фронта также и с температурой приповерхностного воздуха (ТПВ; рис. 4, справа). Последняя была получена из архива реанализа NCEP/NCAR (http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data) и пространственно осреднена для той же области, что и ТПМ. Заслуживает внимания тот факт, что максимальные за весь рассматриваемый период значения интенсивности фронтальной зоны наблюдались во время экстремально высоких (максимальных за последние шесть десятилетий; например, [9]) значений индекса САК в 1992–1993 гг. В это же

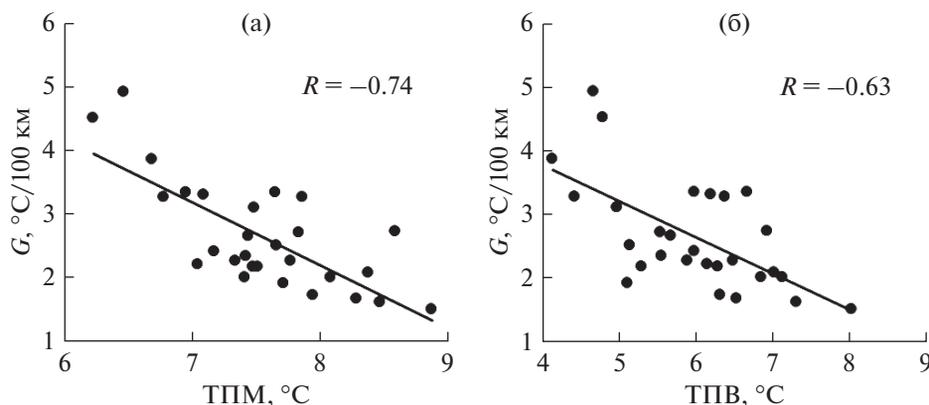


Рис. 4. Корреляция между G и ТПМ (а) и ТПВ (б). R – коэффициенты корреляции.

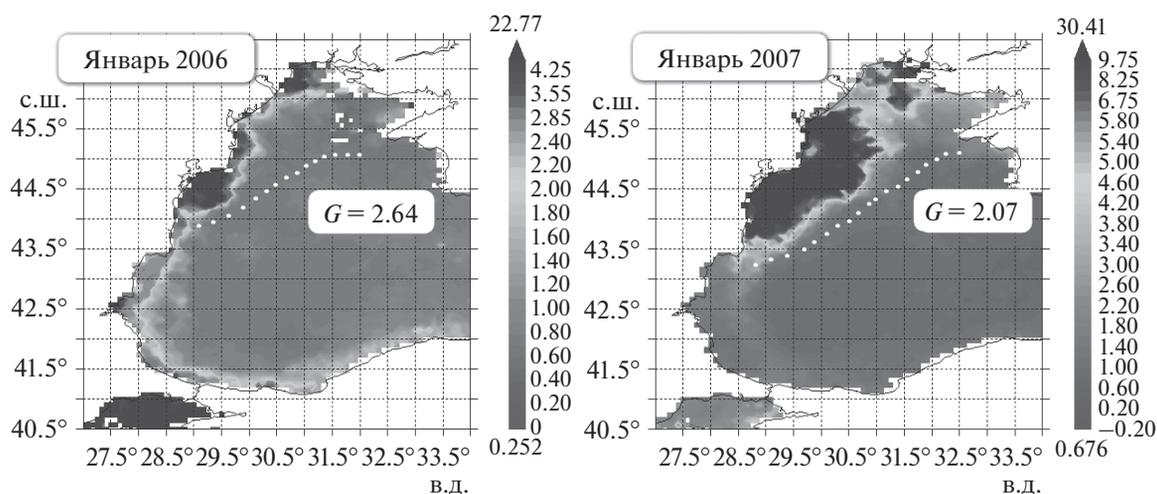


Рис. 5. Распределение концентрации хлорофилла в северо-западной части Черного моря (по данным спутника SeaWiFS) в январе 2006 и 2007 гг. и положение фронтальной зоны (точечная линия). На врезках – интенсивность фронтальной зоны (G , $^{\circ}\text{C}/100$ км).

время имел место и абсолютный минимум ТПМ (рис. 3). Ранее в [8, 9] было показано, что долгопериодная изменчивость среднезимней ТПВ/ТПМ в Черном море определяется вариациями меридиональной компоненты скорости ветра (определяющей адвекцию тепла в регион), связанной, в свою очередь, с изменчивостью САК. В самых общих чертах механизм этой связи выглядит следующим образом: интенсификация/ослабление САК вызывает ослабление/усиление южного ветра, что приводит к уменьшению/увеличению ТПВ за счет изменения поступления тепла и, соответственно, к уменьшению/увеличению ТПМ. Таким образом, изменчивость среднезимних ТПМ/ТПВ в Черном море может служить интегральным индикатором долгопериодной изменчивости фронтальной зоны в северо-западной части, опосредованно связанной с изменчивостью САК.

Фронтальная зона северо-западной части Черного моря может ограничивать распространение

высокопродуктивных шельфовых вод в сторону открытого моря. В качестве примера на рис. 5 представлены карты распределения концентрации хлорофилла (по данным спутника SeaWiFS) в январе 2006 и 2007 гг. и положения фронтальной зоны (точечная линия). На картах черные области в прибрежной зоне соответствуют максимальным концентрациям хлорофилла, а однородный темно-серый фон – водам открытой части моря с низким содержанием хлорофилла. На врезках показана величина градиента ТПМ. В случае более интенсивного, хорошо выраженного и расположенного ближе к берегу фронта (2006 г.) высокие концентрации хлорофилла сосредотачивались в узкой (30–60 км) полосе вдоль северо-западного побережья, что, предположительно, может быть связано с ограничением бокового обмена, связанным с сильным фронтом. Напротив, в условиях более слабого, размытого фронта (и, соответственно, более сильного бокового перемешива-

ния) в 2007 г. область высоких концентраций хлорофилла распространялась в виде обширного пятна на расстояние до 150 км от берега.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Документально подтверждено существование в Черном море пространственно-устойчивых термических фронтальных зон, образование которых связано с региональными климатическими особенностями моря. Фронт в северо-западной части моря характеризуется как межгодовой, так и долгопериодной (кваздекадной) изменчивостью интенсивности градиента ТПМ. Установлена высокая, статистически значимая отрицательная корреляция между величиной градиента ТПМ и среднезимними значениями ТПМ и ТПВ. Изменчивость среднезимних ТПМ/ТПВ в Черном море может служить интегральным индикатором изменчивости интенсивности фронтальной зоны в северо-западной части (а также и интенсивности локального ветрового воздействия, влияющего на формирование мезомасштабных синоптических фронтов), опосредованно связанным с изменчивостью САК. Особая актуальность вопроса связана с тем, что долгопериодная изменчивость интенсивности этой фронтальной зоны может определять (за счет вариаций кросс-фронтального обмена) протяженность области распространения высокопродуктивных шельфовых вод в сторону открытого моря.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 14-50-00095) и средств ИО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В. Атлас температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986–2002 гг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. С. 266.
2. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 240.
3. Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г. и др. Система синоптических вихрей над континентальным склоном северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковые и STD-данные) // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 1. С. 56–63.
4. 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.
5. 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.
6. Казмин А.С., Скляров В.Е. Некоторые особенности циркуляции вод Черного моря по данным ИСЗ “Метеор” // *Исслед. Земли из космоса*. 1982. № 6. С. 42–49.
7. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G. et al. Mesoscale eddies and related processes in the north-eastern Black Sea // *J. Marine Syst.* 2002. V. 32. № 1–3. P. 71–90.
8. 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. Mar. Syst.* 2007. V. 68. P. 293–301.
9. Kazmin A.S., Zatsepin A.G., Kontoyiannis H. Comparative analysis of the long-term variability of winter surface temperature in the Black and Aegean Seas during 1982–2004 associated with the large-scale atmospheric forcing // *Int. J. Climatol.* 2010. V. 30. P. 1349–1359.
10. Santos A.M.P., Kazmin A.S., Peliz A. Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity // *J. Mar. Res.* 2005. V. 63. P. 359–379.
11. Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C8. P. 3246–3272.

Persistent Thermal Fronts in the Black Sea: Existence, Variability and Response to Atmospheric Forcing

A. S. Kazmin

High resolution satellite sea surface temperature (SST) measurements (PATHFINDER dataset) have been used to confirm an existence of persistent thermal frontal zones in the Black Sea. Fronts have been revealed in winter season between the intensively cooling shallow north-western area and warmer waters of central part, and in spring-summer season between the actively warming waters of the south-eastern part and cooler central area. Interannual and quasi-decadal variability of the north-western front as well as high negative correlation of its intensity with the winter-mean SST have been documented.