

УДК 551.465

СИСТЕМА ФРОНТОВ НА ГРАНИЦЕ ВОСТОЧНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ: ИЗМЕНЧИВОСТЬ И СВЯЗЬ С КРУПНОМАСШТАБНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

© 2016 г. А. С. Казьмин

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

Поступила в редакцию 15.12.2014 г.

После доработки 16.03.2015 г.

На основе анализа спутниковых измерений температуры поверхности моря высокого пространственного разрешения (массив PATHFINDER) установлено, что при климатологическом осреднении фронты на океанической границе Восточно-Китайского моря (Тайваньский фронт, фронтальная зона Куроисио и южно-корейский прибрежный фронт) интегрируются в единую доминирующую фронтальную структуру протяженностью свыше 1200 км. Эта структура прослеживается над областью континентального шельфа от о. Тайвань до о. Цусима и отделяет высокопродуктивные воды моря от олиготрофных вод открытого океана. Фронтальная зона Куроисио, входящая в эту структуру, проявляет межгодовую изменчивость с периодами, соответствующими периоду колебаний системы Эль-Ниньо – Южное колебание (4–5 лет).

DOI: 10.7868/S0030157416040079

Желтое и Восточно-Китайское моря представляют собой типичные окраинные моря, открытые для взаимодействия с океаном и испытывающие непосредственное влияние океанических процессов. Соответственно, здесь на сравнительно небольшой акватории сосуществуют фронтальные разделы различной природы и масштаба (от типично океанической фронтальной зоны Куроисио до локальных мелкомасштабных фронтов приливного происхождения), поведение которых определяется сложным взаимодействием разнообразных факторов.

Исследование фронтов Желтого и Восточно-Китайского морей представляет как научный, так и практический интерес, поскольку они оказывают влияние на процессы формирования продуктивности и переноса загрязнений, что крайне актуально для стран региона. Информацию об основных особенностях гидрологического режима и фронтах в этих морях можно найти в [1–11, 13, 14]. Следует, однако, отметить, что цитированные выше работы основаны на судовых гидрологических съемках низкого пространственного разрешения (за исключением [1, 3]) и дают лишь самое общее представление о фронтах. Также, в литературе содержится очень мало сведений о временной изменчивости (в особенности долгопериодной) фронтов (сезонная изменчивость кратко рассмотрена в [3]).

В [1] была представлена схема общей циркуляции и условий формирования основных фронтальных разделов в Желтом и Восточно-Китайском морях, построенная на основе компиляции цитированных выше литературных источников и спутниковых данных. Наиболее специфической особенностью гидрологического режима региона является взаимодействие теплых и соленых вод океанического происхождения, поступающих из юго-восточной части в результате адвекции ветвями Куроисио, с холодными и распресненными водами, локально формирующимися в условиях мелкого окраинного моря. Адвекция теплых соленых вод в рассматриваемый район осуществляется тремя основными ответвлениями Куроисио: Тайваньским теплым течением (ТТТ), теплым течением Желтого моря (ТТЖМ) и Цусимским течением (ЦТ). Компенсационная циркуляция холодных распресненных вод Желтого и Восточно-Китайского морей происходит в виде прибрежных течений, направленных с севера на юг. В [1] были описаны основные фронтальные зоны на океанической границе Восточно-Китайского моря, формирующиеся в областях конвергенции теплых и холодных течений: (1) фронтальный раздел между ТТТ и холодным прибрежным течением, вытянутый вдоль побережья материка от о. Тайвань до устья р. Янцзы (Тайваньский фронт); (2) фронтальная зона Куроисио, приуроченная к области континентального склона и

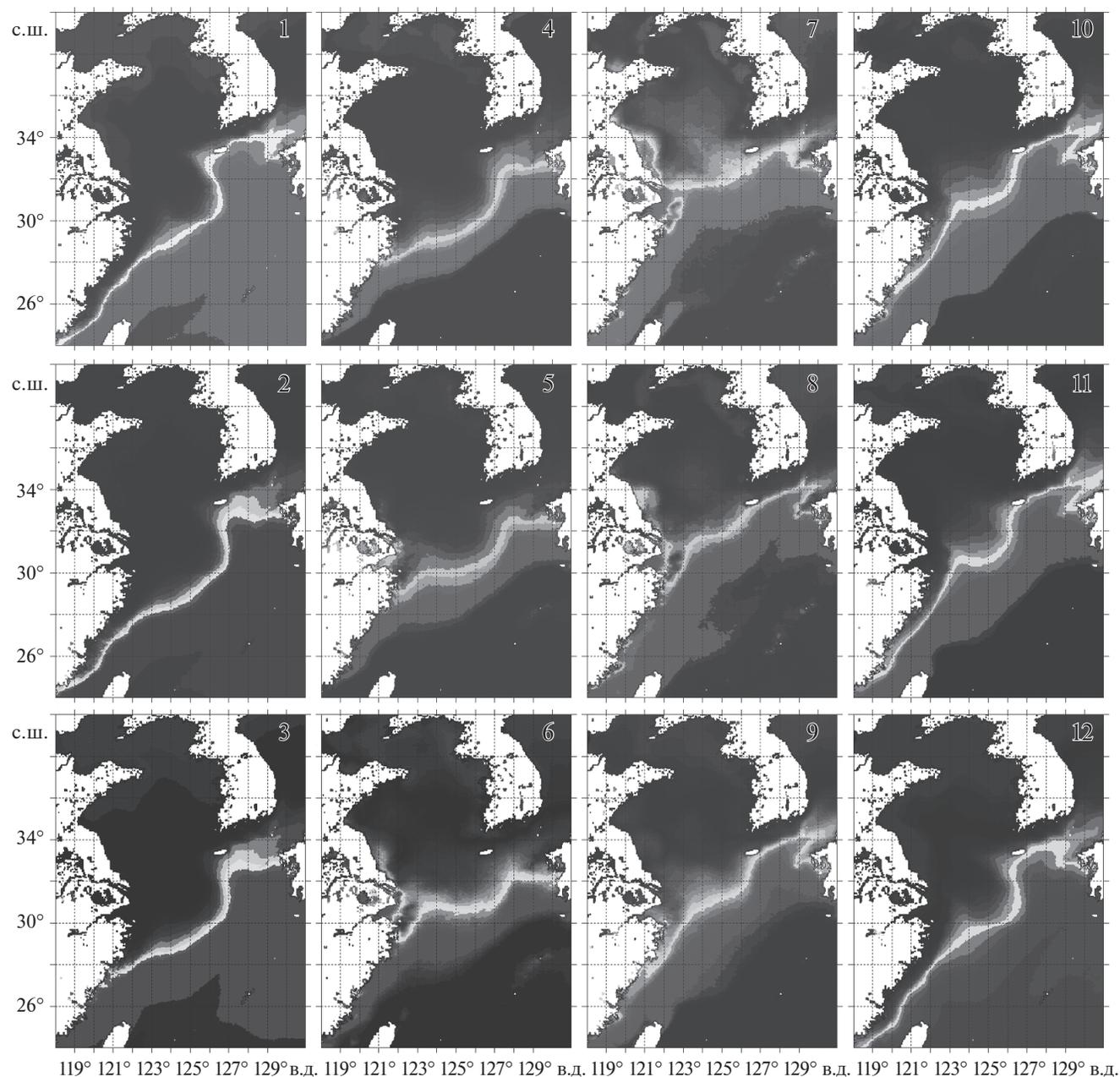


Рис. 1. Среднемесячные климатологические (1982–2008 гг.) карты положения фронтальной системы Тайваньский фронт – фронтальная зона Курошио – южно-корейский прибрежный фронт (по данным PATHFINDER). Узкие светлые полосы соответствуют областям сгущения изотерм, маркирующим положение фронтальных зон. Цифры в верхних правых углах соответствуют месяцам.

представляющая типичную крупномасштабную климатическую фронтальную зону, прослеживающуюся в слое 0–600 м [2, 6]; (3) фронтальный раздел в Цусимском проливе между ЦТ и холодным прибрежным течением вдоль южной оконечности п-ова Корея (южно-корейский прибрежный фронт).

В настоящее время имеются глобальные среднемесячные (период осреднения 1982–2008 гг.) климатологические карты температуры поверх-

ности моря (ТПМ), построенные на основе регулярных спутниковых измерений высокого разрешения (4 км × 4 км; радиометр AVHRR; массив PATHFINDER) в Национальном центре океанографических данных NOAA (<http://data.noaa.gov/las/getUI.do>), позволяющие получать более детальные сведения о фронтах. На рис. 1 представлены среднемесячные климатологические карты ТПМ для акваторий Желтого и Восточно-Китайского морей, модифицирован-

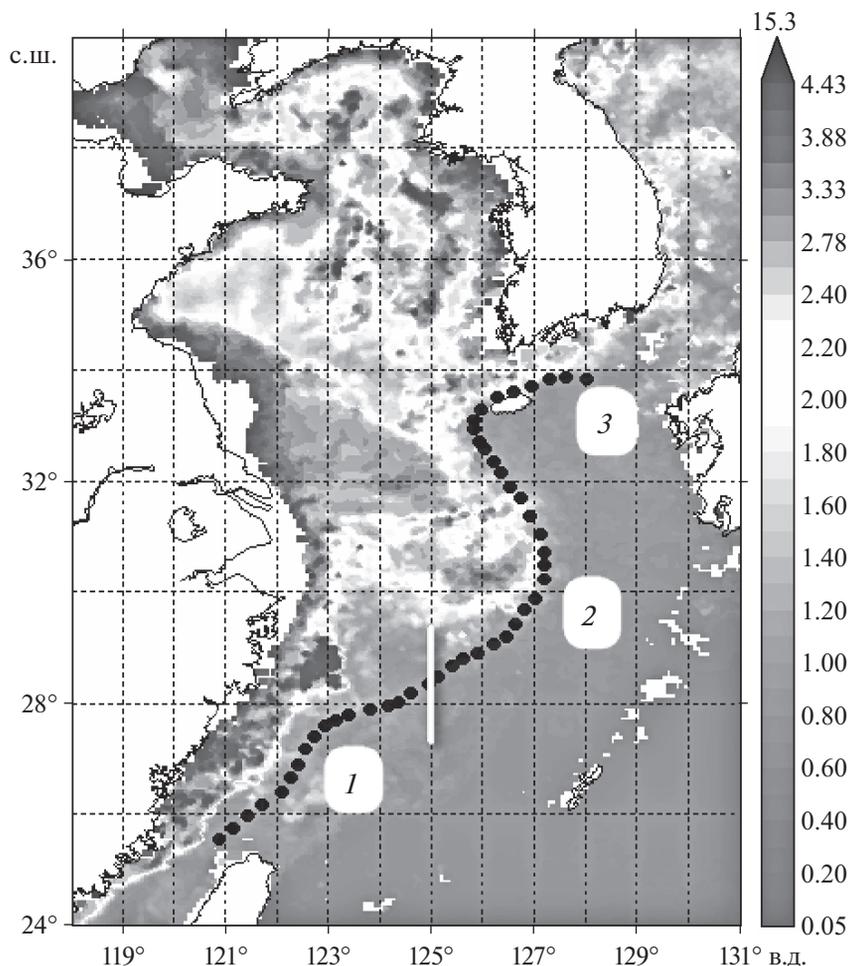


Рис. 2. Концентрация хлорофилла в Желтом и Восточно-Китайском морях в апреле 2004 г. (по данным SeaWiFS). Точки – среднее положение единой фронтальной структуры весной 2004 г. (март–май). Цифры на врезках: 1 – Тайваньский фронт, 2 – фронтальная зона Куроисио, 3 – южно-корейский прибрежный фронт. Вертикальная белая линия – положение разреза, на котором определялось максимальное значение G .

ные таким образом, чтобы выделить доминирующие фронты и их сезонную изменчивость. На этих картах узкие полосы различных оттенков серого соответствуют областям сгущения изотерм, маркирующим положение фронтальных зон (более светлый тон соответствует большей интенсивности фронтов).

Анализ показывает, что при климатологическом осреднении Тайваньский фронт, фронтальная зона Куроисио и южно-корейский прибрежный фронт интегрируются в единую доминирующую фронтальную структуру протяженностью свыше 1200 км, прослеживающуюся над областью континентального шельфа от о. Тайвань до о. Цусима в течение всего года. Максимальная интенсивность этой фронтальной зоны наблюдается в холодный период года (октябрь–март), когда контрасты температуры между теплыми водами Куроисио и выхолаживающими водами Восточно-Китайского моря наиболее высоки. В теплый пе-

риод (май–август) происходит выравнивание температуры и интенсивность фронтальной зоны уменьшается, а также исчезают поверхностные проявления Тайваньского фронта. Тем не менее, в целом рассмотренная фронтальная структура в климатологическом плане сохраняет свою когерентность и устойчивое положение в течение всего года и доминирует в рассматриваемой акватории.

Важность этой фронтальной зоны и ее долгопериодной изменчивости с точки зрения влияния на экосистему региона связана с тем, что она является естественной границей между высокопродуктивными водами Желтого и Восточно-Китайского морей и олиготрофными водами открытой части Тихого океана (рис. 2). На этой иллюстрации концентрация хлорофилла в высокопродуктивных морских водах обозначена градациями тонов от белого (2 мг/м^3) до черного (15 мг/м^3), а олиготрофным океаническим водам соответствует однородная темно-серая область (менее 0.2 мг/м^3).

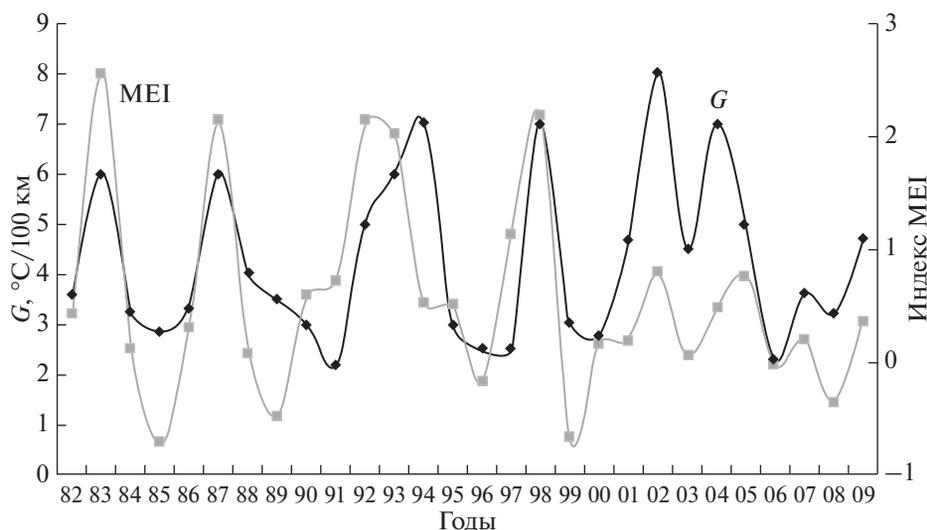


Рис. 3. Долгопериодная изменчивость максимального меридионального градиента ТПМ вдоль 125° в.д. в районе фронта Курошио в Восточно-Китайском море в феврале (G , °C/100 км; черная линия) и индекса MEI (серая линия).

Кросс-фронтальный обмен, связанный с интенсивностью фронта, может влиять на горизонтальные потоки биогенных элементов (а также, что крайне актуально, на потоки загрязняющих веществ). Для исследования долгопериодной изменчивости фронта была рассчитана величина максимального меридионального градиента ТПМ ($G = |\partial(\text{ТПМ})/\partial y|$) вдоль 125° в.д. (см. рис. 2) в районе фронтальной зоны Курошио (28°–31° с.ш.) в феврале (максимальная интенсивность фронтальной зоны) за период 1982–2009 гг. по спутниковым данным (PATHFINDER; <http://data.podc.noaa.gov/las/getUI.do>). Временной ряд G , представленный на рис. 3 (черная линия), подтверждает наличие хорошо выраженной межгодовой изменчивости с периодом 4–5 лет, согласующейся с периодом колебаний системы Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК).

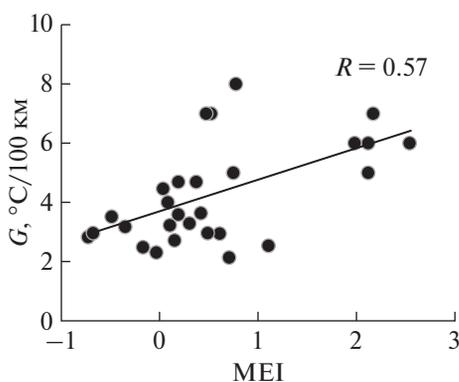


Рис. 4. Корреляция между G и индексом MEI. R – коэффициент корреляции.

Одним из наиболее представительных индикаторов ЭНЮК служит индекс MEI (Multivariate ENSO Index – мультивариативный индекс ЭНЮК; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>). Индекс MEI основан на комбинации первых главных компонент шести измеряемых параметров (атмосферное давление, зональная и меридиональная компоненты ветра, температура поверхности океана (ТПО), температура воздуха и общая облачность). По сравнению с индексами, основанными на аномалиях одного параметра, такими как SOI (атмосферное давление) или ONI (ТПО), индекс MEI дает более комплексное и гибкое описание явления ЭНЮК [12]. Рис. 3 подтверждает наличие ковариаций между G и индексом MEI (серая линия). Нами обнаружена достаточно высокая, статистически значимая положительная корреляция ($R = 0.57$, с уровнем вероятности $p < 0.01$) между G и индексом MEI (рис. 4). Поскольку положительные значения индекса MEI соответствуют событиям Эль-Ниньо, положительная корреляция означает, что усиление интенсивности фронтальной зоны Курошио совпадает с событиями Эль-Ниньо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При климатологическом осреднении Тайваньский фронт, фронтальная зона Курошио и южно-корейский прибрежный фронт интегрируются в единую доминирующую фронтальную структуру протяженностью свыше 1200 км, прослеживающуюся над областью континентального склона от о. Тайвань до о. Цусима в течение всего года и отделяющую высокопродуктивные воды Желтого и Восточно-Китайского морей от олиго-

трофных вод открытого океана. Фронтальная зона Курошио, входящая в эту структуру, испытывает межгодовую изменчивость с периодами, соответствующими периоду колебаний системы ЭНЮК (4–5 лет). При этом максимумы интенсивности фронтальной зоны совпадают с событиями Эль-Ниньо.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казьмин А.С.* Исследование фронтов Желтого и Восточно-Китайского морей по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 3. С. 81–87.
2. *Beardsley R.C., Limeburner R., Hu D. et al.* Structure of the Changjiang River Plume in the East China Sea during June 1980 // Proc. of the Int. Symp. on Sedimentation on the Continental Shelf with Special reference to the East China Sea. 12–16 Apr. 1983, Hngzhou, China. V. 1. Beijing: China Ocean Press, 1983. P. 243–260.
3. *Belkin I.M., Cornillon P.* SST fronts of the Pacific coastal and marginal seas // Pacific oceanography. 2003. V. 1. № 2. P. 90–113.
4. *Byun S.K., Chang K.I.* Tsushima Current Water at the Entrance of the Korea Strait in Autumn // Prog. In Oceanogr. 1988. V. 21. P. 295–306.
5. *Hu Dunxin.* Upwelling and sedimentation dynamics. 1. The role of upwelling in sedimentation in Huanghai Sea and East China Sea – a description of general features // Chin. J. Oceanol. Limnol. 1984. V. 2. № 2. P. 12–19.
6. *Kuroda Y., Hara T., Misumi A. et al.* Hydrographic Profiling Across the East China Sea Shelf Edge by an Underwater Sliding Vehicle with CTD Sensors // Progr. in Oceanogr. 1988. V. 21. P. 401–416.
7. *Lie H.J.* Tidal fronts in the Southeastern Hwanghae (Yellow Sea) // Continental Shelf Res. 1989. V. 9. № 6. P. 527–546.
8. *Mao Hanil, Hu Dunxin, Zhao Baoren et al.* Mesoscale Eddy Movement in the Northern East China Sea // Chin. J. Oceanol. Limnol. 1983. V. 1. № 3. P. 237–247.
9. *Milliman J.D., Ya Hsueh, Hu Dunxin.* Tidal Phase Control of Sediment Discharge from Yangtze River // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. 1984. V. 19. P. 119–128.
10. *Pan J., Zu D., Xu J.* The structure of fronts and their causes in the coastal upwelling area off Zhejiang // Acta Oceanol. Sin. 1987. V. 6. № 2. P. 177–189.
11. *Sha X., Xu B.* Quick reporting state of fishery and sea on the East China Sea and Yellow Sea with NOAA // Proc. of IGARSS'88 Symp. Edinburg, Scotland, 13–16 Sept. 1988. Edinburg, 1988. P. 1405–1408.
12. *Wolter K., Timlin M.S.* El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) // Int. Journal of Climatology. 2011. V. 31. № 7. P. 1074–1087.
13. *Xu B., Sha X.* A preliminary study on nearshore water in China with NOAA satellite images // Proc. of IGARSS'88 Symp. Edinburg, Scotland, 13–16 Sept. 1988. Edinburg, 1988. P. 1413–1416.
14. *Zheng Q., Klemas V.* Determination of winter temperature patterns, fronts and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery // Rem. Sens. of Environ. 1982. № 12. P. 201–218.

Frontal System at the Boundary of East China Sea: Its Variability and Response to the Large-Scale Atmospheric Forcing

A. S. Kazmin

High resolution satellite sea surface temperature measurements (PATHFINDER dataset) indicate that when climatological averaging is applied, fronts at the boundary of East China Sea (Taiwan front, Kuroshio frontal zone and South Korean coastal front) appear as unified dominating frontal structure. This structure is about 1200 km length, spreads over continental shelf from Taiwan to Tsushima and separates productive sea waters from oligotrophic oceanic waters. Kuroshio frontal zone incorporated into this structure reveals interannual variability with the periods consistent with El Niño – Southern Oscillation (4–5 years).