

УДК 551.465

© Г. А. Власова¹, Нгуен Ба Суан², М. Н. Деменок¹¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Россия²Институт океанографии Вьетнамской Академии наук и технологий, г. Нячанг, Вьетнам

gavlasova@mail.ru

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ В ЗОНЕ ВЬЕТНАМСКОГО ТЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОГО ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА ВЕСНОЙ 1999 г.: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 15.05.2015 г., после доработки 30.09.2016 г.

На основе численного моделирования рассчитана интегральная циркуляция вод Южно-Китайского моря в зоне прибрежного Вьетнамского течения в переходный весенний период (май 1999 г.). Южно-Китайское море оказывает существенное влияние на климатический режим стран Юго-Восточной Азии, включая Дальний Восток России. Здесь развиваются тропические циклоны разрушительной силы, приходящие с западной части Тихого океана или зарождающиеся в самом Южно-Китайском море. Указанный год выбран в связи с проведением в этот период крупномасштабной международной экспедиции Рыболовной Ассоциации стран Юго-Восточной Азии и Японии, данные которой представлены вьетнамскими коллегами. Весенний сезон использован как пример перехода от зимнего периода к летнему в силу своей малой изученности. Синоптические процессы в данном регионе значимо влияют на сезонный характер Вьетнамского течения. Зимой под воздействием северо-восточного муссона это течение направлено с севера на юг, вследствие чего формируется циклоническая циркуляция вод; летом при юго-западном муссоне течение направлено в обратную сторону, формируя антициклоническую циркуляцию. Расчеты выполнены для синоптической ситуации, которая характеризуется наличием тропического циклона в южной части Южно-Китайского моря. Результаты моделирования показали, что в указанный период здесь существуют два антициклонических и разделяющий их циклонический круговороты. Вследствие этого в пределах Вьетнамского течения образуются две зоны различной модификации вод: в его северной и южной частях водные массы переносятся с юга на север (летний режим), а в центральной части — с севера на юг (зимний режим). На этом основании сделан вывод о переходном характере выбранного временного интервала, когда сказывается влияние еще не ушедшего зимнего и уже наступающего летнего муссонов.

Ключевые слова: Южно-Китайское море, Вьетнамское течение, зимний и летний муссоны, тропический циклон, атмосферные процессы, циркуляция вод.

G. A. Vlasova¹, Nguyen Ba Xuan², M. N. Demenok¹¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS, Vladivostok, Russia²Institute of Oceanography, Vietnamese Academy of Science and Technology (IO VAST), Nha Trang, Vietnam

THE WATER CIRCULATION OF THE SOUTH CHINA SEA IN A ZONE OF THE VIETNAMESE CURRENT UNDER THE INFLUENCE OF SOUTHERN TROPICAL CYCLONE IN SPRING OF 1999: RESULTS OF NUMERICAL MODELING

Received 15.05.2015, in final form 30.09.2016.

The integrated water circulation of the South China Sea in the area of coastal Vietnamese Current during transitional spring period (May 1999) has been calculated on the basis of numerical modeling. The South China Sea considerably influences the climate regime in South-East Asia, including the Far East of Russia. Here the tropical cyclones of the destructive power coming from the western Pacific or incipient in the South China Sea are developed. This specified year was selected in connection with this period of large-scale international expedition Fisheries Association of South-East Asia and Japan, the data of which are presented by Vietnamese colleagues. Spring season is used as an example

Ссылка для цитирования: Власова Г. А., Нгуен Ба Суан, Деменок М. Н. Циркуляция вод Южно-Китайского моря в зоне Вьетнамского течения в условиях южного тропического циклона весной 1999 г.: результаты численного моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 4. С. 25—34.

For citation: Vlasova G. A., Nguyen Ba Xuan, Demenok M. N. The water circulation of the South China Sea in a zone of the Vietnamese Current under the influence of southern tropical cyclone in spring of 1999: results of numerical modeling. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 4, 25—34.

of the transition from winter to summer because it's poorly investigated. Synoptic processes in the region significantly influence the seasonal the nature of Vietnamese Current. This current is directed from north to south in winter under the influence of the northeast monsoon, thus forming the cyclonic water circulation. This current is directed in the opposite direction in the summer under the influence of the southwest monsoon, forming an anticyclonic circulation. The calculations were performed for the synoptic situation, which is characterized by the presence of tropical cyclone in the southern part of the South China Sea. Results of modeling have showed that two anticyclonic and separating its cyclonic gyres exist in the specified period in the studied area. As a result, two zones of different water modifications within the Vietnamese Current are formed: water masses are transported from south to north in the northern and southern parts of the region (summer regime), and in the central part — from north to south (winter regime). On this basis, it was concluded about a transitional character of the chosen time interval when influence has not yet left winter and already coming summer monsoons affects.

Key words: The South China Sea, Vietnamese Current, winter and summer monsoons, tropical cyclone, the atmospheric processes, the water circulation, numerical modeling.

Южно-Китайское море (рис. 1) является ключевым звеном в цепи крупнейших окраинных морей Тихого океана, оказывающих существенное влияние на гидрометеорологический и климатический режимы стран Юго-Восточной и Восточной Азии, включая Дальний Восток России. Здесь развиваются тропические циклоны (ТЦ) разрушительной силы, приходящие с западной части Тихого океана ($\approx 60\%$) или зарождающиеся в самом Южно-Китайском море ($\approx 40\%$) (рис. 2, а) [1, 2]. Часть из них затем перемещается в северо-восточном направлении, захватывая Восточно-Китайское, Японское и Охотское моря и обрамляющую их сушу, принося разрушения инфраструктуры и человеческие жертвы в странах, расположенных на их пути [3, 4]. Все это делает данный регион тайфуноопасным [5] и требует его всестороннего исследования.

Общее состояние природной среды Южно-Китайского моря и ее континентального и островного обрамления существенно зависит от региональных синоптических процессов (сезонных муссонов, пассатов, тайфунов), которые в свою очередь влияют на формирование структуры течений этого бассейна и их пространственно-временную изменчивость. Из-за влияния муссонов, в условиях обрамляющего акваторию горного рельефа, пространственно-временная структура течений очень специфична. Ярким примером этому служит Вьетнамское (Западное пограничное) течение. Зимой под воздействием северо-восточного муссона это течение направлено с севера на юг, вследствие чего формируется циклоническая

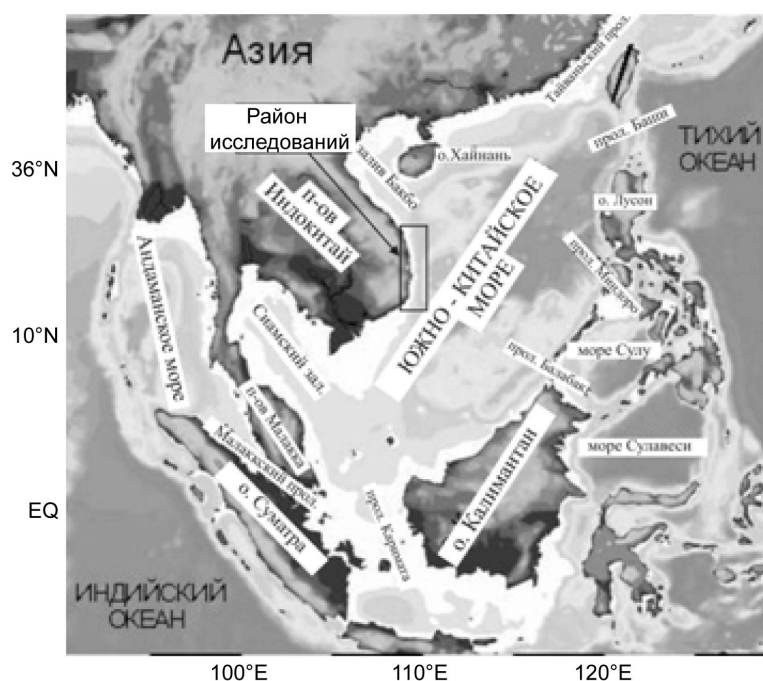


Рис. 1. Карта Южно-Китайского моря.
Район исследования ограничен координатами 11-16° с.ш. и 108-112°30' в.д.

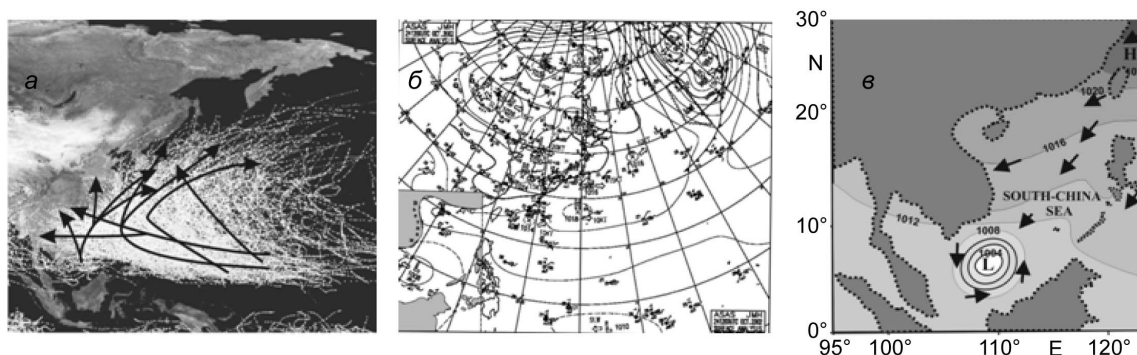


Рис. 2. Синоптическая ситуация над Южно-Китайским морем.

a — пути всех тропических циклонов за период 1980—2005 гг. (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Hurricane Research Division); *б* — распределение атмосферного давления (гПа) при типе атмосферных процессов «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря», синоптическая карта от 25.10.2002 (Японское метеорологическое агентство — JMA); *в* — тип атмосферных процессов «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря» (средняя карта для 217 случаев 2000—2008 гг., составленная авторами).

циркуляция вод; летом при юго-западном муссоне течение направлено в обратную сторону, формируя антициклоническую циркуляцию вод вдоль восточных берегов Вьетнама.

Пионерскими работами на исследуемой акватории можно считать работы французских ученых в 1920—30 гг. [6]. Именно они выдвинули гипотезу о существовании постоянного течения в западной части Южно-Китайского моря вдоль центрального Вьетнама, которое меняет свое направление под воздействием муссонов. Доказательную базу этой гипотезе представил американский ученый К. Виртке в 1961 г. [7]. С этого времени началось активное изучение Вьетнамского течения.

К настоящему времени изучены многие аспекты пространственно-временных характеристик Вьетнамского течения, однако характер его перестройки от зимнего режима к летнему и обратно до сих пор оставался практически не изученным [8, 9]. В немногочисленных работах, посвященных исследованию Вьетнамского течения, описываются, в основном, только сезонные обобщенные характеристики этого течения, без детального сравнительного анализа перестроечных режимов циркуляции вод при смене северо-восточного муссона на юго-западный или наоборот в периоды межсезонья [10—14 и др.]. Это определило цель и задачи наших исследований.

Целью настоящей статьи является исследование вертикальной структуры Вьетнамского течения под влиянием тропических циклонов, зародившихся в южной части акватории Южно-Китайского моря или пришедших туда извне. В основу этого исследования положено численное моделирование. В качестве расчетного сезона использована весна 1999 г. Указанный год выбран в связи с проведением в этот период крупномасштабной международной экспедиции Рыболовной Ассоциации стран Юго-Восточной Азии и Японии (SEAFDEC, Cruise № 57-3/99), данные которой представлены вьетнамскими коллегами и использованы в процессе моделирования (рис. 3).

Краткое описание модели и исходные данные.

Использованная модель подробно описана в монографиях [15, 16], в связи с чем ниже приводятся лишь

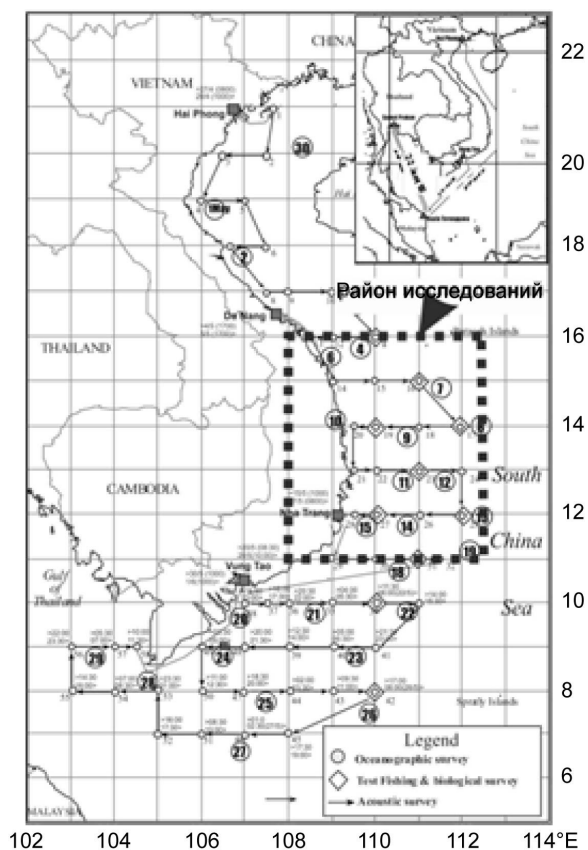


Рис. 3. Схема экспедиционных исследований на акватории за период 21.04—5.06.1999 г.

основные ее характеристики. Для её построения использовалась известная квазигеострофическая модель интегральной циркуляции вод, разработанной А. И. Фельзенбаумом [17, 18] и развитая в работах Н. Б. Шапира и А. С. Васильева [19, 20], которая учитывает пространственное распределение плотности воды, атмосферное воздействие, рельеф дна, очертания береговой линии и водообмен через проливы.

В квазистационарной постановке расчет структуры течений и плотности по заданным на поверхности тангенциальному напряжению ветра и плотности морской воды приводит к решению уравнения для интегральной функции ψ :

$$-\frac{\partial \psi}{\partial \tau_v} + \Delta \psi = F(T, \rho^0, f) ; \psi^L = \psi^K, \quad (1)$$

где L — контур бассейна; T — тангенциальное напряжение ветра; ρ^0 — плотность морской воды на поверхности океана; τ_v — параметр релаксации; f — функция невязок, связанная с введением дополнительного условия по скоростям течений на поверхности; ψ^K — значение интегральной функции тока на внешней границе контура.

Приведенное выше уравнение (1) решается методом минимальных невязок по Марчуку [21], который задачу динамики моря сводит к решению параболического уравнения вида:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \gamma \Delta \zeta + \sigma \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \eta \frac{\partial \zeta}{\partial y} = F, \quad (2)$$

где ζ — некоторая скалярная функция (например, уровень моря, интегральная функция тока, вихрь полного потока) с граничными и начальными условиями; t — время; η, γ, σ — коэффициенты, зависящие от координат x, y и времени t , F — правая часть уравнения, зависящая также от x, y и времени t

$$\text{при } t = 0 \quad \zeta = \zeta_0 \quad (3)$$

на контуре L $\zeta = \zeta^L$. Условие (3) означает, что в начальный момент времени искомая функция ζ известна во всей области, включая границу.

В случае, когда η, γ, σ не зависят от времени, решение уравнения (2) выходит на стационарное (не зависящее от времени) решение. Аппроксимация и сходимость численного решения к решению уравнения (2) достигается при матрице коэффициентов Якобиева типа, которая существует при значениях коэффициентов $\gamma < 0$.

Схема осуществления матричной прогонки проводится по Самарскому [22]:

а) определяются начальные прогоночные коэффициенты;

б) делается «прямая» прогонка с вычислением прогоночных коэффициентов внутри области определения решения;

в) определяется значение функции на границе области при $i = N$;

г) определяется значение функции внутри области и на границе при $i = 0$.

Аналогично осуществляется прогонка по столбцам (по y).

Когда на границе известна определяемая функция, порядок вычислений при решении задачи (Дирихле) методом минимальных невязок следующий:

а) организуется итерационный процесс с шагом по времени;

б) вычисляется невязка внутри области. На границе области в задаче Дирихле невязка равна нулю;

в) используя известные в узлах сеточной области значения коэффициентов η, γ, σ и функцию F определяются матрицы коэффициентов Якобиева типа для прогонки по строкам;

г) осуществляется прогонка по столбцам, используя решение, полученное в прогонке по строкам;

д) определяется параметр релаксации τ_v ;

е) определяется новое приближение искомой функции ζ ;

ж) процесс «б—е» при условии стационарности граничных условий повторяется до тех пор, пока предыдущее значение искомой функции не будет отличаться от последующего на некоторую малую заданную величину.

В нашем случае параметр релаксации $\tau_v = 1$, количество итераций для функции тока на поверхности составило 25, для функции тока до глубины 200 м — 10, для интегральной функции тока — 9, минимальная невязка для функций тока составляет $|7.08 \cdot 10^{-13} \div 1.01 \cdot 10^{-10}|$.

После решения уравнения (1) по явным формулам определяются плотность морской воды, уровень и наклоны уровня, горизонтальное и вертикальное распределение течений, составляющие полных потоков $S_x = \partial\psi/\partial y$ и $S_y = \partial\psi/\partial x$.

На границе рассматриваемой области, дифференцируя один раз вдоль контура составляющих полных потоков, получаем:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} = \frac{\partial S_n}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где S_n — нормальная к контуру бассейна составляющая полного потока; τ — касательная к контуру бассейна.

Для получения граничного условия на контуре бассейна ψ^L и удовлетворения условиям водного баланса и неразрывности достаточно проинтегрировать уравнение (4) вдоль контура бассейна при $\psi = 0$ в начальной и конечной его точках на твердой границе, которые совпадают.

Для дна приняты условия прилипания (скорость течения на дне равна нулю). Задача решалась в односвязной области.

Модель многократно использовалась для численных экспериментов по исследованию динамики вод ДВ морей и северо-западной части Тихого океана [15, 16, 23—28 и др.].

Для моделирования использована следующая входная информация:

— контур береговой линии, приближенный к реальной конфигурации берегового обрамления;
— значения глубин морского дна из массива топографических данных ETOPO-5 (<http://www.ngdc.noaa.gov/docucomp/page?xml=NOAA/NESDIS/NGDC/MGG/DEM/iso/xml/3141.xml&view=getDataView&header=none>);

— значения температуры и солёности на поверхности моря за период 04—19.05.1999 г., полученные в экспедиции Рыболовной Ассоциации стран Юго-Восточной Азии и Японии (SEAFDEC, Cruise № 57-3/99) (рис. 3, 4). Указанные данные экспедиционных измерений температуры и солёности интерполировались в заданную сеточную область и в таком виде использовались для расчетов. На основе представленных вьетнамской стороной значений температуры и солёности на поверхности моря рассчитывалась плотность морской воды. В процессе работы было проведено сопоставление рассчитанной и наблюдаемой плотностей морской воды, согласно которому указанные поля плотности имеют приемлемую сходимость (рис. 5), т. к. ковариация генеральной совокупности (среднее попарных произведений отклонений) $\text{cov} = 0.097052893$, а коэффициент корреляции $R = 0.815339$;

— вертикальное распределение плотности, взятое из экспедиционных данных по максимально глубоководной станции, т. к. вертикальное распределение плотности в Южно-Китайском море, особенно в переходный период, не является однородным по глубине;

— значения атмосферного давления (рис. 6), соответствующие выбранному типу синоптических процессов над Южно-Китайским морем [29], заимствованные из данных Японского Метеорологического агентства в виде ежедневных синоптических карт приземных полей атмосферного давления для четырех основных синоптических сроков: 00, 06, 12, 18 ч Гринвича за период 2000—2008 гг. Таким образом, в качестве начальных условий было взято поле атмосферного давления, соответствующее

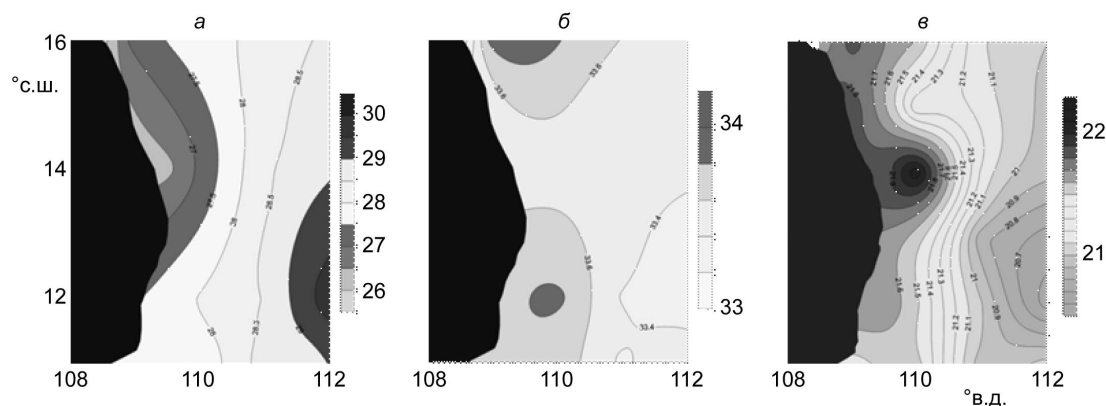


Рис. 4. Наблюдаемые поля температуры (а), солёности (б) и плотности (в) для района 11—16° с.ш. и 108—112°30' в.д. Южно-Китайского моря за период 4—19.05.1999.

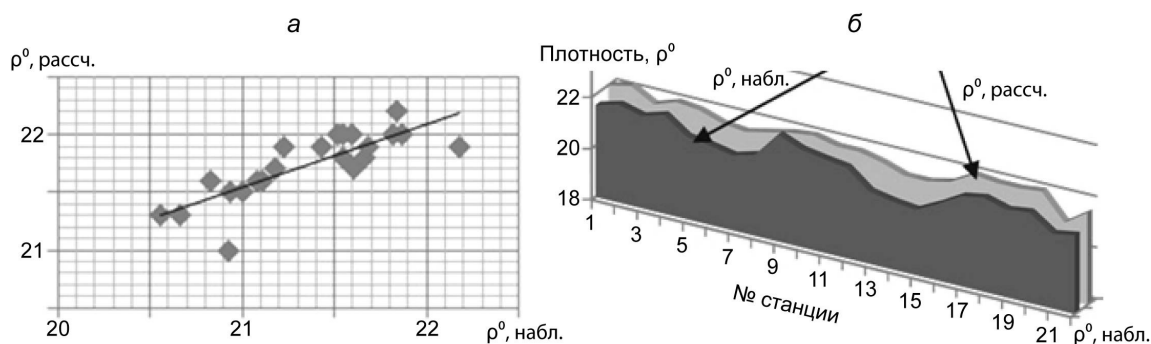


Рис. 5. Сопоставление наблюдаемой и рассчитанной плотностей морской воды для акватории Вьетнамского течения.

а — график рассеяния точек наблюдаемой ($\rho^0_{набл.}$) и рассчитанной плотности ($\rho^0_{рассч.}$) морской воды;
б — объемное представление наблюдаемой ($\rho^0_{набл.}$) и рассчитанной плотности ($\rho^0_{рассч.}$) морской воды.

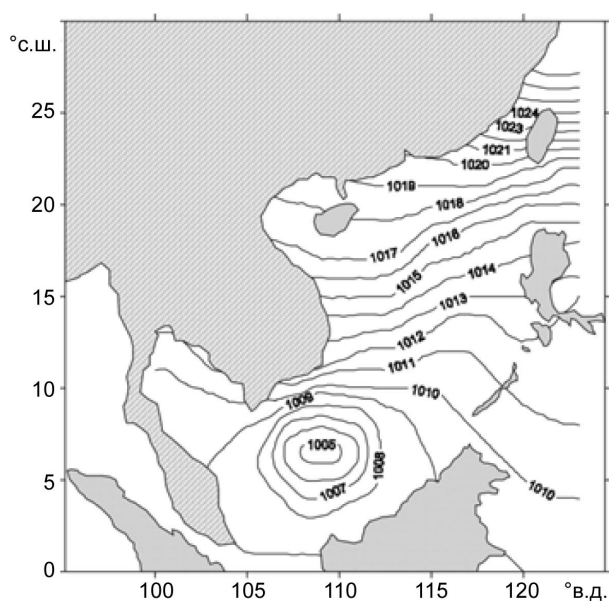


Рис. 6. Поле атмосферного давления над Южно-Китайским морем при типе синоптических ситуаций «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря» за период 4—19.05.1999 г.

рассматриваемому типу синоптических процессов. В результате получена смоделированная циркуляция вод за период 4—19 мая 1999 г. при заданном атмосферном форсинге.

Для учета атмосферных процессов над Южно-Китайским морем была использована их типизация, представленная в работе [29]. Основными материалами для типизации атмосферных процессов над Южно-Китайским морем послужили ежедневные приземные синоптические карты погоды Японского метеорологического агентства (ЈМА) за четыре основных синоптических срока: 00, 06, 12, 18 ч Гринвича за период 2000—2008 гг. Каждые 6 ч ежедневно в пределах указанного периода определялись центры высоких и низких барических образований и их пройденный путь, иными словами, строились сборно-кинематические карты. Построение сборно-кинематических карт выполнялось последовательно и непрерывно от карты к карте до тех пор, пока циклон (антициклон) не уходил за обрез карты или не заполнялся, если это циклон, и не разрушался, если это антициклон. В случае выхода нового

циклона последний включался в работу и отслеживался. Такая сборно-кинематическая карта строилась последовательно и непрерывно до тех пор, пока характер траекторий циклонов (антициклонов) сохранялся. Как только один из основных признаков типизации менялся, строилась новая сборно-кинематическая карта и т. д.

В соответствии с цитируемой работой в регионе выделено три типа и три подтипа атмосферной циркуляции, названные: «малоградиентное поле», «малоградиентное поле с зоной сильного ветра в северной половине моря» и «тропический циклон с выходом в северную, центральную и южную часть моря».

Публикации с использованием атмосферного форсинга над акваторией Южно-Китайского моря отсутствуют. Указанная типизация используется впервые. Первым шагом в нашем совместном российско-вьетнамском исследовании было изучение циркуляции вод в условиях муссонного климата в макромасштабном режиме, где в качестве «эталонного эксперимента» использовался тип «малоградиентное поле», который обладает наибольшей суммарной годовой продолжительностью действия и наиболее характерен для весеннего сезона [30]. Данный тип не связан с влиянием тропических циклонов и, таким образом, отражает «спокойную» атмосферную обстановку в исследуемом регионе. Вторым шагом являлось исследование структуры Вьетнамского течения в условиях краткосрочных гидрометеорологических

явлений (тропические циклоны): с малой (юг), средней (север) и максимальной (центр) долей вероятности формирования циклонов в разных участках моря, по-разному влияющих на циркуляцию вод. В наших исследованиях был использован тип, названный «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря» (рис. 2, б, в). Выбор типа обусловлен тем, что он обладает меньшей повторяемостью и интенсивностью из всех других типов тропических циклонов, т. к. формируется на юге Южно-Китайского моря, а тропические циклоны южнее 8° с.ш. возникают очень редко. Таким образом, мы переходим от «спокойной» ситуации к редким тропическим возмущениям. Максимальная продолжительность действия данного типа атмосферных процессов составляет 29 сут. Скорость ветра не превышает 10–15 м/с. Максимальная суммарная годовая повторяемость данного типа атмосферных процессов составляет не более 15 %.

Для расчетов использовалась равномерная сетка $30 \times 30'$, в соответствии с данными, предоставленными вьетнамскими коллегами. На этой основе была рассчитана циркуляция вод в поверхностном слое (слой, порождаемый перемешиванием воды при разрушении поверхностных волн, ветровым перемешиванием и вертикальной плотностной конвекцией), в слое от поверхности моря до горизонта 200 м (слой, в котором происходят наиболее активные термодинамические процессы) и от поверхности до дна с учетом выбранной синоптической ситуацией (учет проводился на основе ввода данных поля давления заданного атмосферного форсинга).

Результаты и их обсуждение. Как известно, в весенний период ослабевает или прекращается зимний муссон. При усиленном прогреве суши начинается формирование летнего типа атмосферной циркуляции, установление юго-западных муссонных ветров, скорость которых весной составляет 4–5 м/с и более. С ослаблением северо-восточного муссона уменьшается площадь распространения вод тропической структуры. Соответственно изменяются и характеристики водных масс. Заметно увеличивается температура поверхностной водной массы — на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ для тропической и трансформированной тропической структур, на $2\text{--}3^\circ\text{C}$ — экваториально-тропической. С ослаблением зимнего ветрового перемешивания уменьшается толщина верхнего однородного слоя на всей акватории моря. Наибольшим изменениям в переходный весенний период подвергаются воды трансформированной тропической структуры: наблюдается уменьшение минимума солености промежуточного слоя по сравнению с зимним сезоном. Также в весенний период наблюдается увеличение площади распространения распресненных вод р. Меконг и выравнивание соленостных характеристик вод в западной акватории моря [31].

В соответствии с данными большинства ранее выполненных исследований (без учета атмосферного форсинга) район прибрежных вод Вьетнама относится к той части Южно-Китайского моря, где в апреле еще сохраняются течения, обусловленные зимним муссоном, однако в его центральной части начинают появляться разнонаправленные потоки и образование множества небольших вихрей. В мае над всей акваторией моря, как правило, преобладают ветры южного, юго-западного направления и наступает летняя циркуляция вод, обусловленная летним муссоном (перенос водных масс с юга на север) [10–12 и др.].

Однако по результатам выполненного нами моделирования на исследуемой акватории под влиянием типа синоптических процессов «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря» получилась несколько иная гидродинамическая ситуация. Вьетнамское течение, по крайней мере, в исследованный переходный период «зима-лето» не представляет собой единого неразрывного потока водных масс в модельной области. Вместо этого в данном районе существуют три гидродинамических круговорота: два антициклонических и разделяющий их циклонический (рис. 7). Антициклоническая циркуляция является следствием уже наступающих летних муссонных ветров. Циклоническая циркуляция вод на рассматриваемом участке может быть объяснена наличием здесь мощного апвеллинга, возникающего в весенний период у восточных берегов Вьетнама. В работе [32] причиной этого явления называется смена муссонов, а также вытянутость береговой линии в меридиональном направлении.

Как видно из рис. 7, в северной и южной частях исследуемого района Вьетнамское течение имеет летнее направление (с юга на север и северо-запад), а в его центре — противоположное зимнее (с севера на юг и юго-восток). Эта картина в целом сохраняется для всех рассчитанных слоев, претерпевая изменения лишь в деталях.

Рассмотрим это подробнее. Так, на *поверхности моря* формируются смешанные структуры: два ярко выраженных антициклона, разделенных между собой циклоном (рис. 7, а). Антициклоны ограничены

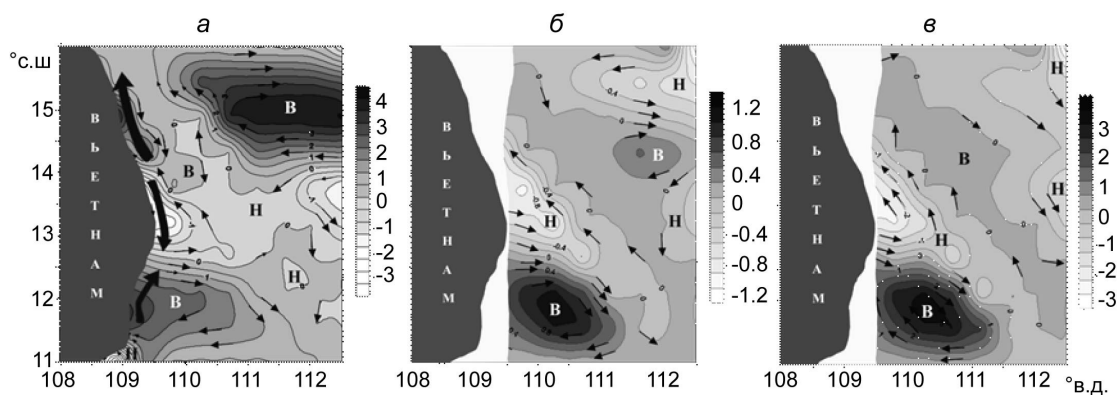


Рис. 7. Интегральные функции тока на акватории Вьетнамского течения.

а — функции тока на поверхности (1×10^7 см³/с); *б* — интегральные функции тока в слое 0—200 м (1×10^{11} см³/с); *в* — интегральные функции тока от поверхности до дна (Св) за период 04—19.05.1999 г., белым цветом оконтурена область 200-м изобаты, где расчеты некорректны. Н — циклон, В — антициклон.

следующими координатами: $\approx 13^\circ 40' - 16^\circ$ с.ш.; $11^\circ 10' - 12^\circ 40'$ с.ш. и $109^\circ - 112^\circ 30'$ в.д., циклон: $12^\circ 40' - 14^\circ 15'$ с.ш. и $109^\circ 20' - 112^\circ 30'$ в.д. Северный антициклон имеет два вихря: один вдоль побережья Вьетнама, вытянутый в северо-западном направлении, и второй достаточно мощный, занимающий практически всю центральную и восточную часть исследуемого региона, вытянутый в широтном направлении. Южный антициклонический круговорот занимает всю южную часть исследуемого района, простираясь вглубь региона в его восточной части до $13^\circ 15'$ с.ш., однако его основной вихрь расположен вблизи берегов Вьетнама. Общая ориентировка этой структуры — широтная. Располагающийся между ними циклонический круговорот занимает площадь сложной конфигурации общей субширотной ориентировки и включает два субмезомасштабных вихря, один из которых располагается у берегов Вьетнама, а другой — на крайнем востоке изучаемого района с выходом за его пределы. Оба вихря вытянуты в юго-восточном направлении. При этом его узкая северная ветвь простирается вглубь северного антициклона вплоть до $14^\circ 50'$ с.ш., тем самым разделяя его на западную и восточную части. Циклоническая структура, создающая режим «зимней циркуляции» (движение вод с севера на юг), располагается между северным и южным антициклоническими круговоротами с «летним режимом» движения вод (с юга на север). Пространственно расширяясь, они с севера и юга начинают вытеснять циклоническую структуру, стремясь установить летний режим течений. В юго-западной части акватории выделился небольшой циклонический вихрь, который, вероятно, связан с рассматриваемым типом синоптических ситуаций. Максимальная рассчитанная скорость ветра составляет 11.41 м/с, что соответствует скорости ветра данного синоптического типа (10—15 м/с) [29].

В слое 0—200 м (рис. 7, б) северный и южный антициклонические круговороты соединяются, образуя единое антициклональное поле в центре и юге региона, вытянув циклоническую структуру узкой полосой в юго-восточном направлении от 16° до $11^\circ 30'$ с.ш. на расстоянии 90 морских миль. Отсюда можно считать, что в непосредственной близости от берега все еще сохраняется зимний режим Вьетнамского течения, а за пределами 90 миль от побережья наступает летний режим потока вод. Возможно, это связано с существованием противотечения на внешнем шельфе моря, несущего водные массы с юга на север [11]. При этом южная антициклоническая структура сохраняется, и становится достаточно мощной, а северная — слабой. Поверхностный циклонический вихрь на юго-западе акватории, полученный в результате моделирования, в слое до 200 м не сохранился, при этом атмосферный форсинг не менялся. Вероятно, это связано с особенностями рассматриваемого сезонного времени — периоде весенне-летнего прогрева моря, когда формирование верхнего квазиоднородного слоя происходит при устойчивой вертикальной стратификации, затрудняющей развитие турбулентности, главным источником которой является ветроволновое перемешивание, ограниченное по глубине. Толщина такого слоя в этот период составляет несколько десятков метров, в связи, с чем подобные структуры на больших глубинах не образуются.

Схема интегральной циркуляции вод от поверхности до дна (рис. 7, в) во многом подобна схеме течений в слое 0—200 м. Практически вся акватория, за исключением ее южной части, где сохраняется мощный антициклон, диагонально разделена чередующимися слабо выраженными гидродинамическими

структурами. В центре района вдоль побережья Вьетнама сохраняется зимняя модификация Вьетнамского течения, а на расстоянии в ≈ 50 морских миль наблюдается летняя. В работах [11, 33] утверждается, что, начиная с горизонта 200 м вплоть до глубины 2000 м, циркуляция вод в Южно-Китайском море представляет собой крупномасштабный циклонический круговорот, и протяженность течения южного направления вдоль берегов Вьетнама составляет ≈ 350 миль. В южной и северной частях акватории сохраняется летняя циркуляция вод.

Полученные нами результаты в целом согласуются с исследованиями на смежных площадях, имея и некоторые отличия. Так, по результатам моделирования на основе трехмерной диагностической модели, изложенной в работе [14], в пределах аналогичного временного периода, но годом ранее на пограничной площади было обнаружено два аналогичных антициклонических вихря с координатами в центре 15° с.ш., $111^\circ 30'$ в.д. и $11^\circ 40'$ с.ш., $111^\circ 10'$ в.д. Кроме этого, численные значения циркуляции вод по оценкам авторов работы [12] в среднем не превышают ± 3 Св, что соответствует значениям, полученным нами (± 2.8 Св), и экспедиционным данным [10, 11 и др.]. В другой работе на базе модели НУСОМ (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) [34] показано, что в мае за период 1992—2002 гг. были обнаружены три гидродинамические структуры: циклоническая (14° с.ш. и 110° в.д.) и две антициклонические (12° с.ш. и 110° в.д.; 16° с.ш. и 112° в.д.), аналогичные нашим структурам. Обнаруживаются отличия лишь в оценке численных значений циркуляции вод. В работе [34] они составляют всего 0.2 Св.

Итак, в результате выполненных численных расчетов на основе квазистационарной модели под влиянием типа синоптических ситуаций «тропический циклон с траекторией выхода в южную часть моря» получены следующие основные выводы:

— Вьетнамское течение в переходный период «зима-лето» 1999 г. на исследованной акватории не представляет собой единый неразрывный поток водных масс, вместо этого в данном районе существуют три гидродинамических круговорота: два антициклонических и разделяющий их циклонический круговороты, которые формируют сложный рисунок Вьетнамского течения;

— система указанных круговоротов показывает, что на участках антициклонических структур перенос водных масс вдоль вьетнамского побережья в рассматриваемый период происходит с юга на север (летнее направление). На участке циклонического круговорота движение водных масс здесь происходит в обратную сторону — с севера на юг (зимнее направление). Возникновение последнего фактора, возможно, связано с образованием здесь весенне-летнего апвеллинга. Вероятно, это явилось причиной неполного перехода Вьетнамского течения на летний режим переноса вод вплоть до первой декады июня.

Полученное квазистационарное решение представляет собой некоторую экстремальную оценку циркуляции вод в Южно-Китайском море, которая возникла бы при постоянном во времени ветре и фиксированном распределении плотности на морской поверхности.

Данная работа выполнена в рамках российско-вьетнамского соглашения о научном сотрудничестве между ТОИ ДВО РАН и Институтом океанографии Вьетнамской Академии наук и технологий от 16.06.2010 (ОМС ДВО РАН № 585) и грантом ДВО РАН № 12-III-A-07-001.

Литература

1. Zhao X., Pang H., Li X., Song P. Abnormal incident analysis of tropical cyclones influencing South China Sea in 1997 // J. Trop. Oceanogr. 2008. V. 27, N 1. P. 11—15.
2. Данг К. М. Океанологические условия Южно-Китайского моря // Морской сборник. 1974. № 4. С. 91—93.
3. Барабашкина А. П., Лескова Е. А. Исследование тайфунов, выходящих на Японское море и Приморский край // Труды ДВНИГМИ. 1968. Вып. 3. С. 3—33.
4. Мамедов Э. С., Павлов Н. И. Тайфуны. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 137 с.
5. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 508 с.
6. Chevey P., Carton P. Les courants de la mer de Chine meridionale et leurs rapports avec le climat de l'Indochine // Note Inst. Ocean. Indochine. 1935. V. 26. P. 13.
7. Wyrki K. Scientific results of marine investigation of the South China Sea and Gulf of Thailand // NAGA Report. 1961. 195 p.
8. Qinyu Liu, Arata Kaneko, Su Jilan. Recent progress in studies of the South China Sea circulation // J. Oceanogr. 2008. V. 64. P. 753—762.
9. Власова Г.А., Буи Хонг Лонг, Таранова С.Н., Нгуен Ба Суан, Беляев В.А., Юрасов Г.И., Ле Динх Май. Состояние изученности Южно-Китайского моря. Препринт: Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН. Владивосток, 29.04.2010. № 98. 57 с.
10. Uda M., Nakao T. Water masses and currents in the South China Sea and their seasonal change // Proc. of The Kuroshio III. Proc. of the third CSK Symposium. Thailand, Bangkok. 1973. P. 161—188.

11. Нгуен З. Т. Циркуляция вод Южно-Китайского моря в зимний и летний сезоны. Дис. канд. геогр. наук: 25.00.28. Владивосток, 1990. 177 с.
12. Xie S., Xie Q., Wang D., Liu W. T. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 3261.
13. Zhou Hui, Yuan Dong liang, Li Ruixiang, He Lei. The western South China Sea currents from measurements by Argo profiling during October to December 2007 // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2010. V. 28, N 2. P. 398—406.
14. Yuan Y., Liao G., Xu X. Three dimensional diagnostic modeling study of the South China sea circulation before onset of summer monsoon in 1998 // J. Oceanogr. 2007. V. 63, N 1. P. 77—100.
15. Полякова А. М., Власова Г. А., Васильев А. С. Влияние атмосферы на подстилающую поверхность и гидродинамические процессы Берингова моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 203 с.
16. Власова Г. А., Васильев А. С., Шевченко Г. В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 359 с.
17. Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 235 с.
18. Фельзенбаум А. И. Динамика морских течений // Гидродинамика. Итоги науки. Сер. Механика. М.: ВИНТИ, 1970. С. 97—338.
19. Шапиро Н. Д. Формирование циркуляции в квазиизопикнической модели Черного моря с учетом стохастичности напряжения ветра // Мор. гидрофиз. журн. 1998. № 6. С. 26—40.
20. Васильев А. С. Прогностическая вихреразрешающая модель основных физических полей океана // Теория динамических процессов. Севастополь, 1983. С. 57—67.
21. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана на основе метода расщепления. Л.: Гидрометиздат, 1974. 303 с.
22. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971, 552 с.
23. Васильев А. С., Власова Г. А. Исследование гидродинамических структур в Южно-Курильском районе западной части Тихого океана // Исследования океанов и морей. Тр. ГОИНа. 2000. Вып. 207. С. 55—69.
24. Vlasova G. Interaction of water and atmospheric circulation in Far Eastern Seas // CD-ROM Proceeding 1-st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization, N. 206, Athens, Greece, 6—9 July, 2005, 7 p.
25. Власова Г. А. Сезонная изменчивость циркуляции вод Берингова моря // Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 266—279.
26. Vlasova G. A. Research of the hydrodynamic processes of NW Pacific on the basis of modeling // Ky niem 85 nam than lap vien hai duong hoc, ky yeu hoi nghi khoa hoc quoc gia. Hanoi: Publishing house for Science and Techonology, 2008. P. 701—708.
27. Власова Г. А., Глебова С. Ю. Сезонная изменчивость поверхностных течений Охотского моря под влиянием синоптических процессов // Изв. ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 259—269.
28. Vlasova G. A. Estimation of the hydrodynamic regime of the water movement under the influence of the atmospheric processes in the Bering Sea and the Sea of Okhotsk // J. of Environmental Science and Engineering. 2011. V. 5, N. 10. P. 1276—1281.
29. Полякова А. М. Типизация атмосферных процессов над Южно-Китайским морем // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 17—24.
30. Власова Г. А., Нгуен Ба Суан, Буй Хонг Лонг. Влияние синоптических процессов на динамику Вьетнамского течения (Южно-Китайское море) весной 1999 г. // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 36—46.
31. Атлас по океанографии Южно-Китайского моря. URL: <http://pacificinfo.ru/data/cdrom/9/text.html> (дата обращения: 14.05.2015).
32. DanLing Tang, Hiroshi Kawamura, Tran Van Dien, MingAn Lee. Offshore phytoplankton biomass increase and its oceanographic causes in the South China Sea // Marine ecology progress series. 2004. V. 268. P. 31—41.
33. Chao S. Y., Shaw P. T., Wang J. Deep water ventilation in the South China Sea // Deep Sea Res. 1996. Part 1, V. 43. P. 445—466.
34. Wang Qingye, Cui Hong, Zhang Shuwen. Water transports through the four main straits around the South China Sea // J. of Oceanogr. And Limnol. 2009. V. 27, N 2. P. 229—236.