

Многомерный статистический анализ спутниковых полей напряжения и завихренности ветра в районе Японского моря

О.О. Трусенкова

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.
E-mails: trolia@poi.dvo.ru; otrusenkova@mail.ru

Изменчивость напряжения и завихренности ветра над Японским морем исследована по ежедневным полям из массива QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds с пространственным разрешением 0.5° , полученного оптимальной интерполяцией спутниковых и модельных данных за период с июля 1999 г. по июль 2009 г. Выполняется разложение векторов напряжения ветра на комплексные эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) по исходным и низкочастотным (с отфильтрованной, на основе вейвлет-преобразования, синоптической изменчивостью) полям. Две старшие моды подобны в обоих разложениях, а третья связана с синоптическим масштабом. Первая мода определяет направление муссонного ветра над морем в целом, на которое последующие моды не оказывают существенного влияния. Характерной особенностью является резкая внутрисезонная смена направления ветра (на масштабах больше синоптического) и полимодальность распределения в теплый период года. На основе статистик направления ветра построены типовые поля напряжения, которые верифицируются непосредственным ЭОФ-анализом вихря. Старшая мода соответствует периоду зимнего муссона, в том числе выявляются мезомасштабные особенности, обусловленные орографией прилегающей суши. Вторая и третья моды соответствуют теплому периоду года и характеризуются вихрем противоположного знака над центральной и северной частями моря.

Ключевые слова: спутниковая скаттерометрия, напряжение и завихренность ветра, эмпирические ортогональные функции, вейвлет-преобразование, гистограмма, восточноазиатский муссон, Японское море, сезонная изменчивость, типовые поля.

Введение

Дистанционное зондирование является важнейшим источником регулярных данных о поверхности морей и океанов и атмосфере, в частности спутниковые скаттерометрические измерения позволяют восстанавливать скорость и направление ветра вблизи водной поверхности. С июля 1999 г. по середину ноября 2009 г. такие измерения выполнялись с помощью инструмента SeaWinds на борту спутника QuickSCAT, обеспечивая данные в полосе зондирования дважды в сутки с разрешением $1/4^\circ$ - $1/8^\circ$. Данные отсутствуют в зонах расхождения полос или в областях сильных осадков ввиду искажения сигнала обратного рассеяния. Во многих случаях предпочтительнее поля без пропусков, получаемые интерполяцией спутниковых измерений с модельными данными реанализа, такие как глобальный массив QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds.

Японское море находится в области восточноазиатского муссона с характерной сезонной изменчивостью ветра. В относительно стабильных условиях зимнего муссона преобладает северо-западный (СЗ) ветер. Режим летнего муссона весьма изменчив, что приводит к преобладанию южного ветра в средних месячных полях и существенно заниженным значениям напряжения и вихря, а реальная скорость ветра по судовым измерениям в несколько раз выше (Дашко и Варламов, 2003). Современные массивы ежедневных данных позволяют провести статистически обоснованную типизацию полей ветра и получить их количественные характеристики, в частности для применения в гидродинамических моделях Японского моря.

Ранее было выполнено разложение на комплексные эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) полей напряжения ветра над Японским морем по данным реанализа NCEP с 1°-м разрешением (Трусенкова и др., 2007). Старшая мода задает общее направление муссонного ветра над морем как основу для объективной классификации и построения типовых полей напряжения и завихренности путем осреднения внутри заданных интервалов азимута. Полученные поля соответствуют экспертным типам Глебовой (2003). Однако не было рассмотрено влияние младших мод разложения, возможное вследствие значительной дисперсии данных, не предлагались объективные критерии для выбора числа классов, вследствие грубой сетки появились вдольбереговые зоны нереалистичного вихря. Целью данной работы является обоснование ранее полученных результатов путем анализа спутниковых данных на временных масштабах, превышающих синоптический, оценка вклада младших мод, обоснование классификации на основе статистик направлений ветра и верификация результатов путем ЭОФ-анализа завихренности.

Данные и методы

Зональная и меридиональная компоненты скорости ветра в районе Японского моря (34°-53°N, 127°-143°E) за период с июля 1999 г. по июль 2009 г. извлечены из глобального массива QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds, свободно доступного в Интернете. Этот массив объединяет спутниковые данные высокого разрешения, измеряемые дважды в сутки, но с частыми пропусками, и модельные поля реанализа, получаемые 4 раза в сутки, с низким разрешением, но с полным покрытием. Спутниковые измерения используются там, где они доступны, а в остальных случаях выполняется оптимальная интерполяция. Итоговые поля имеют дискретность во времени 6 часов и пространственное разрешение 0.5°. Напряжение ветра рассчитывалось на основе балк-параметризации в 1287 квадратах района. Завихренность напряжения ветра (далее – вихрь) рассчитывалось в центрах 386 квадратов (только над морем) на основе центральных разностей.

Низкочастотная фильтрация проводилась с помощью вейвлет-преобразования с использованием материнского вейвлета Морле 6-го порядка и периодами отсечения 7 и 40 дней для напряжения ветра и его вихря соответственно, что позволило удалить изменчивость, связанную с синоптическим масштабом атмосферы. Дифференцирование при расчете вихря увеличивает уровень шума, что требует большего сглаживания. При использовании периодов отсечения 15 и 30 дней были получены те же результаты.

Разложение векторных полей ветра на ЭОФ выполняется в комплексной форме: зональная и меридиональная составляющие ветра соответствуют вещественной и мнимой частям комплексного сигнала. Обсуждаются амплитуда и фаза пространственных и временных компонент разложения (далее – пространственная и временная амплитуда и фаза). Амплитуда задает интенсивность сигнала, а фаза, изменяющаяся в пределах от 180° до 180°, – повороты векторов в пространстве и во времени в направлении против или по часовой стрелки при ее возрастании или убывании; нулевая фаза соответствует западному ветру. Разложение полей вихря выполняется в скалярной форме. В обоих случаях собственные числа и вектора рассчитываются на основе корреляций между пространственными точками поля для выявления аномалий как высоко-, так и низкоамплитудных сигналов.

Статистическая значимость рассматриваемых далее старших трех мод разложения исходных полей напряжения ветра, двух мод фильтрованных полей напряжения и трех мод фильтрованного вихря подтверждена тестированием на основе метода Монте-Карло, а собственные числа различимы в смысле ошибок. Правомерность рассмотрения этих мод подтверждается последующими перегибами в спектре собственных чисел, после которых доля учитываемой дисперсии резко падает (рис. 1, 5). Относительно небольшую долю общей дисперсии, учитываемой старшими модами разложения вихря (16.5%, 7.3% и 6.1% соответственно) можно объяснить усилением шума при дифференцировании.

Основные моды изменчивости напряжения ветра

Три старшие моды разложения исходных полей напряжения ветра полностью соответствуют своим аналогам, полученным по данным реанализа (Трусенкова и др., 2007), в том числе по доле учитываемой дисперсии. После исключения синоптической изменчивости сохраняются две старшие моды (рис. 1, 2). Низкочастотная фильтрация увеличивает долю общей дисперсии, учитываемой старшей модой, с 26.5% до 50.2%, а при отсечении периодов меньше 15 дней – до 59%. Для интерпретации рассчитаны вклады мод в исходные поля (рис. 1) как $X_k(r,t) = \tau^x k + i\tau^y k = (A_k(r)e^{-i\phi_k}) * B_k(t)e^{i\phi_k}$, где $k = 1, 2, 3$ – номер моды, r и t – пространственные координаты и время, $\tau^x k$ и $\tau^y k$ – зональная и меридиональная компоненты, A_k и B_k – пространственная и времененная амплитуда, ϕ_k – пространственная и временная фаза, i – мнимая единица, $*$ – комплексное сопряжение. B_k здесь принимается равной своему стандартному отклонению, а ϕ_k равна нулю. Старшая мода определяет общее направление ветра, вклад второй противоположен в районах к югу и северу от 42°-44°N, а третья задает дивергенцию, связанную с процессами синоптического масштаба.

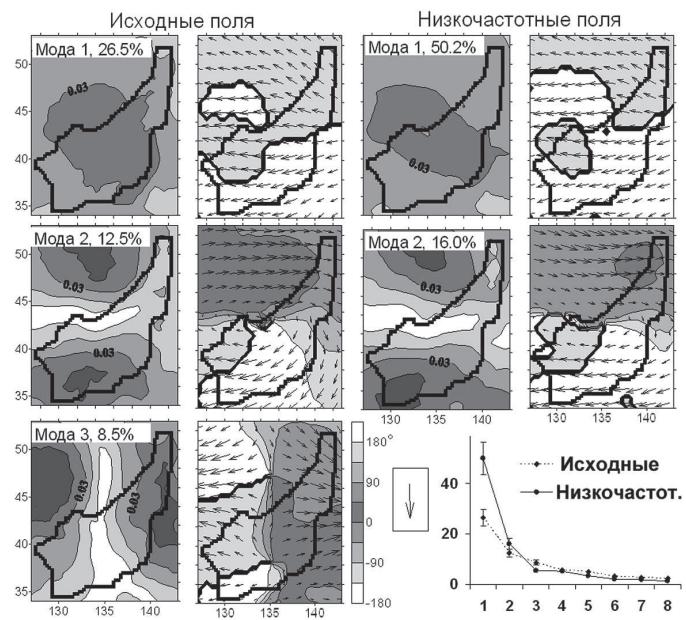


Рис. 1. Спектры (% дисперсии) собственных чисел разложения полей напряжения ветра. Пространственная амплитуда (левые колонки; изолинии проведены через 0.01 с интенсификацией тона к большим значениям) и фаза (правые колонки; градусы; показана масштабная линейка) старших мод. На поля фазы нанесены вектора напряжения, связанные с этими модами (для нулевой временной фазы); масштабный вектор соответствует 1 дин/см²

Во временной амплитуде присутствует годовой ход и межгодовая и внутрисезонная изменчивость, даже после удаления вклада синоптических процессов (рис. 2). Временная фаза (рис. 2) первой моды стабильна в период зимнего муссона, со значениями, в среднем, $\sim 135^\circ$, что соответствует преобладающему СЗ ветру. В теплые месяцы года фаза изменяется в интервале ($180^\circ, 50^\circ$), с преобладанием южной составляющей ветра. Кластеры фазы второй моды наблюдаются на $\pm 180^\circ$ и 45° в холодный и теплый периоды года соответственно, т.е. зимой в северной части района ветер восточный и в южной – западный, а летом – северо-западный и юго-восточный (ЮВ). Временная фаза третьей моды наиболее изменчива, однако имеются кластеры зимой вокруг -45° , а летом в интервале 45° - 135° , соответствующие синоптическому антициклону или циклону над всей областью.

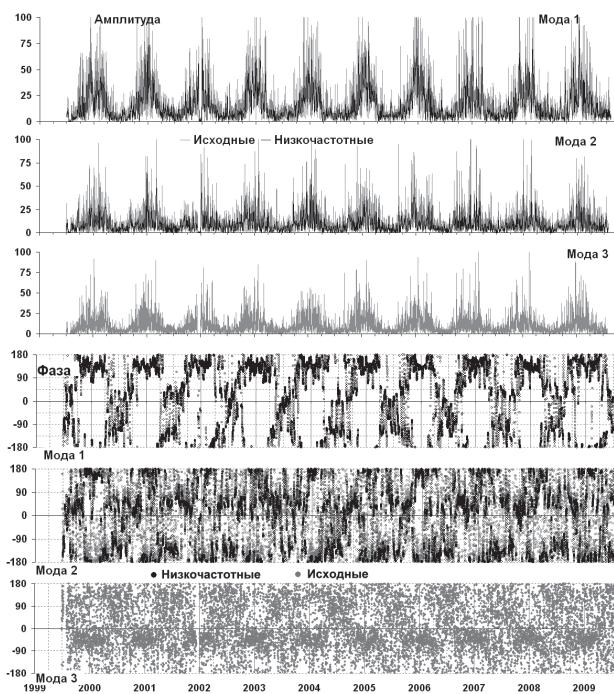


Рис. 2. Временная амплитуда (дин/см²) и фаза (°) старших мод разложения векторных полей напряжения ветра (серым для исходных и черным для фильтрованных полей)

На масштабах больше синоптического заметный вклад в направление ветра над районом, определяемое старшей модой, могла бы внести только вторая мода. В среднем, соотношение временных амплитуд составляет $B_1/B_2 \sim 2.5$, а пространственных – $A_1/A_2 > 2, 1$ и 0.6 к северу от 41° - 42° N, 38° - 39° N и 36° - 37° N соответственно, т.е. отклонение векторов напряжения ветра за счет вклада второй моды не превышает $10^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ соответственно. Лишь в самом южном районе, прилегающем к Корейскому проливу, оно может достигать 40° . Таким образом, старшая мода разложения достаточно хорошо описывает ветер над Японским морем.

Сезонная изменчивость и типовые поля напряжения ветра

Сезонные изменения рассматриваются на основе гистограмм направления ветра, построенных по 5° -м градациям временной фазы старшей моды фильтрованных полей (рис. 3; фаза преобразована как $\phi' = -\phi + 90^\circ$ к принятому в метеорологии стандарту). Как ожидалось, СЗ ветер доминирует в период зимнего муссона, являясь единственной модой с ноября

по февраль, а в другие месяцы гистограммы би- или полимодальны, в апреле и сентябре наблюдается рыхлая структура. В периоды смены муссона усиливается зональность: мода западного ветра наблюдается в марте и апреле, а в октябре она сливается с СЗ модой.

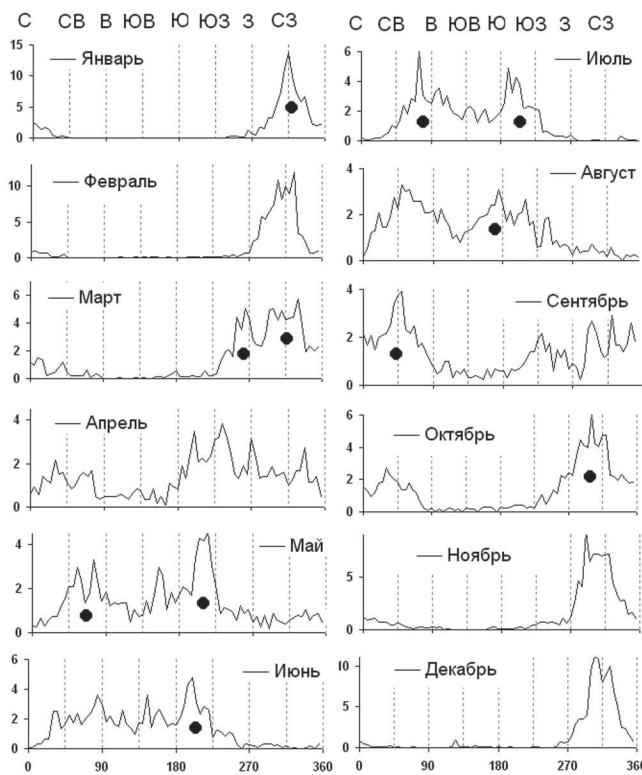


Рис. 3. Гистограммы направления ветра, основанные на 5°-х градациях временной фазы первой моды разложения фильтрованных полей напряжения ветра. Отмечены моды, которым соответствуют типовые поля на рис. 4

Мода юго-западного (ЮЗ) ветра является сильнейшей с апреля по июнь, но другими модами в эти месяцы тоже нельзя пренебречь. В июле наблюдается четко выраженная бимодальная структура, с восточной и ЮЗ модами. Примечательно, что в августе и сентябре сильна северо-восточная (СВ) мода, которая была слабой в данных реанализа (Трусенкова и др., 2007). Южный ветер, преобладающий в средних месячных полях, не является доминирующей модой, а СЗ мода наблюдается не только в период зимнего муссона, но также в апреле и сентябре.

Совместный анализ распределения временной фазы (рис. 2) и гистограмм (рис. 3) показывает, что, в среднем, ветер над Японским морем поворачивает с северо-запада на запад и юго-запад от зимы к весне, на юг и юго-восток к середине и на восток и северо-восток к концу лета. При переходе к зимнему муссону возможен дальнейший поворот на север и северо-запад, но также и обратный поворот ветра к югу, западу и северо-западу. Даже при удаленной синоптической изменчивости возможны резкие внутрисезонные изменения направления ветра, проявляющиеся в немонотонности временной фазы.

Для количественной оценки муссонного ветра построены типовые поля напряжения ветра путем осреднения внутри мод гистограмм. Осреднение производится в интервалах направлений 35°-45°, что превышает возможный поворот ветра за счет вклада второй моды. Вихрь, главный фактор воздействия ветра на общую циркуляцию вод, рассчитывается по

среднему полю напряжения. Типовые поля напряжения и вихря, в целом, подобны полученным ранее по данным реанализа для равновеликих по интервалам направлений классов (Трусенкова и др. 2007). Как и раньше, напряжение ветра в полях периода летнего муссона хотя и ниже, чем зимой, в несколько раз превышает средние месячные величины и близко к данным судовых измерений.

Поля С3 типа в октябре – марте подобны своим средним месячным аналогам. В зимние месяцы преобладает циклонический (Ц) вихрь (региональные особенности обсуждаются ниже). В сентябре – ноябре, марта и апреле в полях С3 типа преобладает антициклонический (АЦ) вихрь (рис. 4). Наиболее повторяемый в ранний период летнего муссона ЮЗ тип характеризуется диполем вихря вдоль оси моря в апреле, мае, июле и АЦ вихрем над центральной частью моря в июне, августе и сентябре. Последнее также свойственно зональному западному ветру. Юго-юго-восточному (ЮЮВ), восточному и СВ типам свойственно распределение вихря, противоположное типам с западной составляющей (рис. 4).

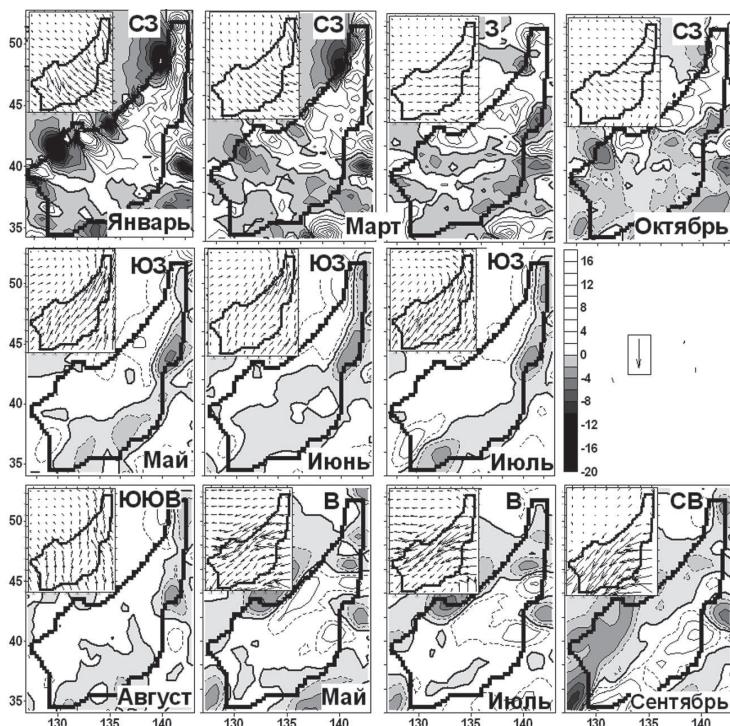


Рис. 4. Типовые поля напряжения и вихря ветра, соответствующие модам гистограмм, для характерных месяцев года. Масштабный вектор соответствует 1 дин/см² для января, марта и октября и 0.2 дин/см² для остальных месяцев. Изолинии вихря проведены через 2×10^{-8} дин/см³; дополнительные изолинии показаны пунктиром, нулевая изолиния – жирным. Положительные и отрицательные значения соответствуют циклоническому и антициклоническому вихрю

Моды изменчивости завихренности напряжения ветра

Пространственная функция первой моды разложения вихря на ЭОФ (рис. 5) соответствует полю периода зимнего муссона, рассчитанному по средним месячным или типовым полям напряжения С3 ветра (рис. 4), с преобладающим Ц вихрем. Вдоль западного берега моря располагаются вихревые диполи, связанные с ветровыми струями над долинами, расходящимися хребты. Диполь в районе к югу от Владивостока хорошо известен (Дашко и

Варламов, 2003); сетка в 0.5° позволила воспроизвести диполи меньших размеров, а также обусловленные схождением ветровых струй зоны Ц вихря от Восточно-корейского залива и вдоль $36^\circ\text{-}37^\circ\text{N}$, где происходит отрыв от берега Восточно-корейского течения – западного пограничного течения Японского моря (рис. 5). Временная функция положительна с ноября до середины марта (рис. 5); она сильна в холодные зимы 2000-2001 гг. и 2005-2006 гг. и слаба в теплые зимы 2001-2002 гг. и 2006-2008 гг.

Вторая и третья моды разложения статистически значимы и различимы в смысле ошибок, однако их собственные числа ближе друг к другу, чем к соседям (рис. 5), что побуждает рассматривать их совместно. Обе моды характеризуются противоположным вкладом в исходные поля над центральной и северной частями моря (рис. 5). Вторая мода преобладает в области к югу от 44°N , а третья – к северу от 42°N , поскольку их суммарные вклады в поля вихря в квадратах 1 и 2 (рис. 5) коррелируют с соответствующими временными функциями на уровне 0.97-0.98. Они превышают вклад первой моды с середины марта по октябрь (рис. 5), описывая вихрь при смене муссона и летнем муссоне.

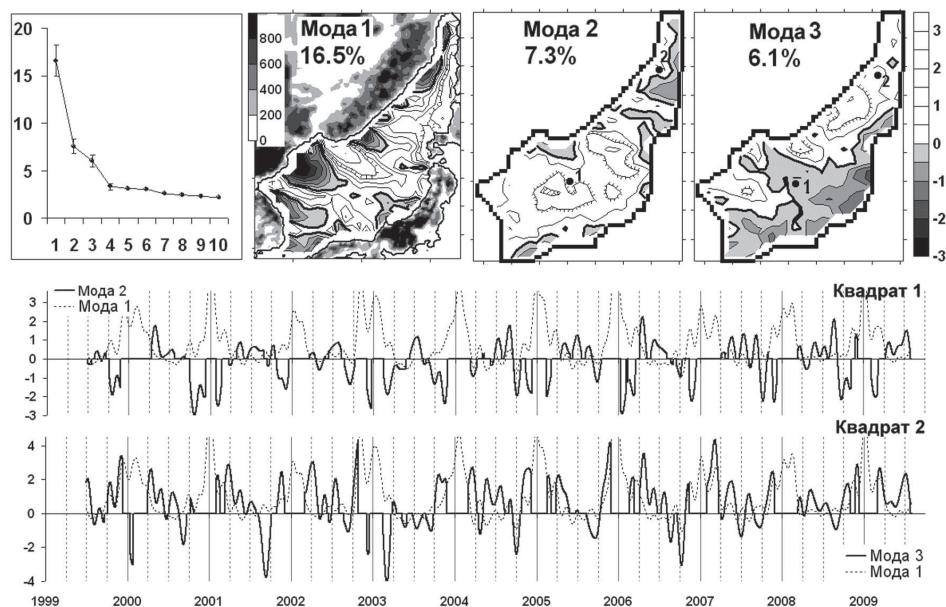


Рис. 5. Собственные числа (% дисперсии) и пространственные функции старших мод разложения полей вихря (10^{-8} дин/см 3), умноженные на стандартные отклонения временных функций. Засечки направлены в сторону меньших значений, нулевая изолиния показана жирным; помечены квадраты, в которых рассчитывались вклады в поля вихря. Показана орография суши (м). Вклады трех старших мод в поля вихря (10^{-8} дин/см 3) в квадратах 1 и 2; вклады младших мод приравнены к нулю, когда вклад первой моды превышает их по абсолютной величине

К югу от 44°N осенью и в конце зимы – начале весны преобладает АЦ вихрь, а в июле – сентябре наблюдаются колебания между Ц и нулевым вихрем (рис. 5 для второй моды). Этому соответствует распределение вихря в полях СЗ и западного типов в марте и октябре и восточного типа в конце лета (рис. 4), часто повторяемых в соответствующие месяцы (рис. 3). Исключение составляют 2000 и 2006 гг., когда в апреле доминировал Ц вихрь. Напротив, к северу от 44°N весной – в первой половине лета и осенью развивается Ц вихрь, а в конце лета – начале осени наблюдаются колебания между АЦ и нулевым вихрем (рис. 5 для третьей моды). Типовым полям с западной составляющей ветра в этом районе свойственна ветровая струя по оси протяженного бассейна с высокими берегами и преобладание Ц вихря, а для восточного и СВ типов – слабый АЦ вихрь по правую сторону ветровой струи (рис. 4).

Заключение

Выполнено разложение на комплексные ЭОФ векторных полей напряжения ветра в районе Японского моря по спутниковым данным. Ведущая мода описывает режим восточноазиатского муссона с характерными внутригодовыми изменениями направления ветра, на которое последующие моды не оказывают существенного влияния. Построены статистически обоснованные типовые поля напряжения ветра, которые верифицируются ЭОФ-анализом вихря. Они соответствуют экспертной типизации Глебовой (2003) и типовым полям, основанным на данных реанализа (Трусенкова и др., 2007). Новые результаты дополнительно обосновывают проведенные ранее численные эксперименты с гидродинамической моделью под воздействием типовых полей (Trusenkova et al., 2009) и интерпретацию аномалий температуры поверхности Японского моря как связанных с динамическими процессами (Трусенкова и др., 2008).

Литература

1. Глебова С.Ю. Типы атмосферных процессов над дальневосточными морями, межгодовая изменчивость их повторяемости и сопряженность // Известия ТИНРО. Т.134. Владивосток: ТИНРО-центр, 2003. С. 209-257.
2. Дацко Н.А., Варламов С.М. Метеорология и климат // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / ред. А.С. Васильев, Ф.С. Терзиев, А.Н. Косарев. СПб: Гидрометеоиздат, 2003. С. 19-103.
3. Трусенкова О.О., Каплуненко Д.Д., Лобанов В.Б. Изменчивость температуры поверхности Японского моря и ее связь с полем завихренности ветра // Известия Академии наук, Физика атмосферы и океана. 2008. № 4. С. 553-566.
4. Трусенкова О.О., Станичный С.С., Ратнер Ю.Б. Основные моды изменчивости и типовые поля ветра над Японским морем и прилегающими районами суши // Известия Академии наук, Физика атмосферы и океана. 2007. №5. С 688-703.
5. Trusenkova O., Nikitin A., and Lobanov, V. Circulation features in the Japan/East Sea related to statistically obtained wind patterns in the warm season // J. Mar. Sys. 2009. V. 78. P. 214-225.

Multivariate analysis of wind stress and curl around the Japan Sea

Trusenkova O.O.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
690041 Vladivostok, 43 Karbysheva Str.
E-mail: trolia@poi.dvo.ru

Wind variability around the Japan Sea is studied using daily data from the global 4 times daily 0.5°-gridded QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds product spanning the period from July 1999 through July 2009. The complex empirical orthogonal functions (EOF) of wind stress vectors from the original and low-pass filtered fields are computed. The low-pass filtering removing synoptic variability is performed using wavelet transform. In both cases, patterns for the first and second modes are the same, while the third mode is related to synoptic timescale. The first mode determines general wind directions, characteristic of the East Asia monsoon, while contribution of the higher modes is not significant. Seasonal wind variability is studied, using monthly histograms of general wind directions based on the first mode. Sharp intraseasonal wind shifts occur in the warm season beyond the synoptic time-scale. Typical wind patterns are composed by averaging within local histogram maxima. They are verified by the direct EOF analysis of wind stress curl which yields the winter pattern as the leading mode. The second and third modes are characteristic for the warm season, with the opposite curl sign over the central and northern Japan Sea.

Keywords: satellite scatterometry, wind stress and curl, empirical orthogonal functions, wavelet transform, histogram, East Asia monsoon, the Japan Sea, seasonal variability, typical patterns.