

УДК 551.509.22

Интенсивные циклоны северо-западной части Тихого океана

Н.Г. Котович¹, Л.Н. Василевская¹, А.С. Филь³, В.В. Крохин²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия;

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева

Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия;

*³Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия
ngkotovich@mail.ru*

Исследованы интенсивные циклоны северо-западной части Тихого океана (СЗТО), зарождающиеся в субтропической (субтропические) и в умеренной зоне (юго-восточная часть Евразии и моря, прилегающие к ней) в зимний период 1996–2018 гг. Основными признаками выделения таких циклонов являются взрывной характер их развития и наличие теплового ядра в нижней или верхней тропосфере. Оценка термической и вертикальной структуры вихрей определялась по методу Р. Харта. Разработана классификация интенсивных зимних циклонов СЗТО, в основу которой положены районы их зарождения и термическое состояние в процессе развития. Показано, что по методике Р. Харта возможно определение наличия и эволюции теплового ядра на основе использования современных численных моделей, в частности модели HWRF.

Ключевые слова: интенсивные циклоны, северо-западная часть Тихого океана, термическая структура циклонов, субтропические и гибридные циклоны

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-48-64>

Intensive cyclones of the Northwest Pacific

N.G. Kotovich¹, L.N. Vasilevskaya¹, A.S. Fil³, V.V. Krokhin²

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;

²V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,

Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

*³Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
ngkotovich@mail.ru*

The intense cyclones of the Northwest Pacific originating in the subtropical (subtropical ones) and mid-latitude (southeastern Eurasia and the seas adjacent to it) zones in the winter of 1996-2018 are studied. The main signs for the identification of such cyclones are the explosive nature of their development and the presence of a warm core in the lower or upper troposphere. The assessment of the thermal and vertical structure of the vortices is carried out by the method of R. Hart. A classification of the intensive winter cyclones of the Northwest Pacific has been developed, which is based on the areas of their generation and on the thermal state in the process of development. It is shown that the Hart method allows determining the presence and evolution of the warm core based on the modern numerical models, in particular, the HWRF model.

Keywords: intense cyclones, Northwest Pacific, thermal structure of cyclones, subtropical and hybrid cyclones

Введение

Субтропические и гибридные циклоны Атлантического океана изучаются давно зарубежными гидрометеорологами. В последнее время им, наряду с тропическими циклонами, стали присваиваться имена [7]. Существует сайт известного австралийского метеоролога Р. Харта, на котором помещены сведения о циклонах, их развитии и смещении в глобальном масштабе [<http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/help.html>]. Особое внимание уделено прогнозу возникновения и эволюции интенсивных циклонов над Атлантикой.

Исследованием циклонической деятельности над северо-западной частью Тихого океана (СЗТО) в нашей стране занимались В.П. Тунеголовец (ДВНИГМИ, 1998) [10], А.П. Агаркова (ДВНИГМИ, 1960) [1], Е.А. Аксарина (ДВНИГМИ, 1965) [2], В.Ф. Воронина (ДВНИГМИ, 1975) [4] и ряд других ученых. Однако в отдельную категорию не были выделены субтропические циклоны, они входили в общую группу так называемых «южных» циклонов.

По мнению Р. Харта, субтропические циклоны совмещают в себе признаки тропических и внетропических вихрей, для них зачастую характерно наличие теплого ядра в тропосфере. Такая термическая структура характерна для отдельных внетропических циклонов, которые были определены нами как гибридные. Они имеют четко выраженную фронтальную структуру и зарождаются вне субтропической зоны (юго-восточная часть Евразии и моря, прилегающие к ней). В зимнее время глубокие субтропические и гибридные циклоны вызывают опасные и особо опасные явления (сильные ветры, интенсивные осадки, волнение, обледенение, морские нагоны) на морях и в прибрежных районах СЗТО.

Субтропические и гибридные циклоны возникают во влажном воздухе при слабой бароклинности в нижней тропосфере и сопровождаются процессами передачи скрытого тепла конденсации на верхние уровни. Главными факторами для дальнейшего углубления этих циклонов, согласно Р. Харту [20], является сложная термическая структура (с очагом холода (или тепла) в верхней тропосфере и тепла (или холода) – в нижней тропосфере) и наличие значительного горизонтального градиента температуры в области вихря.

Несмотря на значительный накопленный опыт в исследовании интенсивных циклонов [11, 13, 35], успешность прогнозов опасных и неблагоприятных условий погоды, связанных с этими барическими образованиями, особенно над СЗТО, остается не столь высокой.

Целью этой работы является типизация всех интенсивных циклонов с привлечением методики Р. Харта [19, 20, 21], возникших над морской акваторией, прилегающей к восточной части Азии. Методика Р. Харта позволяет выявить наличие теплого ядра в углубляющихся циклонах; подробнейший алгоритм расчета термобарических характеристик состояния атмосферы представлен в работе [20], опубликованной в 2003 году.

Под интенсивными циклонами в настоящей работе понимаются циклоны, интенсивно углубляющиеся не менее 6 гПа (дискретность расчетной модели) за 6 ч и скоростью ветра более 12 м/с. Для достижения этой цели решались следующие задачи: создание базы данных о зарождении в районе 25–42° с. ш., 115–150° в. д. зимних интенсивных циклонов; типизация и оценка их термической структуры в нижнем и верхнем слоях тропосферы по Р. Харту.

Используемые данные и методика исследования

Для исследования интенсивных циклонов использовались: карты приземного барического поля и барической топографии за декабрь–февраль 1996–2018 гг. с сайта метеорологического японского агентства [http://www.argos-net.co.jp/awc_vm/fx_top.php], который ежедневно архивируется сотрудниками ТОИ ДВО РАН [<https://www.poi.dvo.ru/weather/www.hbc.co.jp>]; сведения о взрывном циклогенезе в СЗТО (до 180° в. д.), представленные на совместном сайте Университета Кюсю, Центра гидрологии Земли, Университета Нагоя [http://fujin.geo.kyushu-u.ac.jp/meteorol_bomb/view/list.php]; архив реанализа ERA INTERIM GFS [11]. Районом исследования являются акватории Желтого, Восточно-Китайского, Японского морей и северо-западная часть Тихого океана, прилегающая к Японии.

На первом этапе строились сборные карты траекторий циклонов независимо от особенностей их развития (прошедших или не прошедших процесс взрывного углубления). Затем проводилось тестирование каждого циклона по особенностям термической структуры и асимметрии вихря в течение всего жизненного цикла барического образования. Исследование термической и вертикальной структуры циклонов производилось по методике Р. Харта. Согласно этой методике [20], термическая структура циклонов определяется с помощью трех параметров: «В», $-V_T^L$, $-V_T^U$.

«В» – это термическая асимметрия вихря, представляющая собой разность толщины слоя 900–600 гПа справа и слева по ходу движения циклона на расстоянии 500 км от центра. Укажем на то, что превышение 600 гПа над 900 гПа представлено средним значением, вычисленным полойно через каждые 50 гПа в полукруге радиусом 500 км.

Параметр «В» вычисляется по формуле:

$$B = h(Z_{600\text{гПа}} - Z_{900\text{гПа}}) / R - (Z_{600\text{гПа}} - Z_{900\text{гПа}}) / L, \quad (1)$$

где $h = +1$ – для Северного полушария и $h = -1$ – для Южного полушария; Z – геопотенциальная высота; R – указывает на правую часть, L – на левую часть от направления движения циклона. Положительное значение параметра «В» показывает адвекцию тепла, а отрицательное – адвекцию холода в нижней части циклона. Отметим, что максимальные

величины «В» по Р. Харту [24] составляют 5–10 м (для теплого симметричного тропического вихря). Использование относительного превышения анализируемых изобарических поверхностей (зависящего от температурно-влажностного состояния слоя) является универсальным при вычислении «В», делая этот параметр устойчивым к кратковременным колебаниям температуры, которые могут возникнуть в результате эволюции циклона.

$-V_T^L$ – это разность максимальной и минимальной толщины слоев (м) в нижней (900–600 гПа) тропосфере, которая фактически показывает термическую структуру нижней центральной части вихря в радиусе 500 км. $-V_T^L$ вычисляется по формуле:

$$-|V_T^L| = \left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \right|_{900 \text{ гПа}}^{600 \text{ гПа}}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p}$ – термический ветер внутри слоев нижней и верхней тропосферы, который рассчитывается послойно через каждые 50 гПа; ΔZ – разность высот, которая находится путем сравнения высоты в центре циклона и за пределами (в данном случае Δ – это расстояние в 500 км).

$-V_T^U$ – вычисляется в верхней (600–300 гПа) тропосфере по аналогии с предыдущим параметром:

$$-|V_T^U| = \left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \right|_{600 \text{ гПа}}^{300 \text{ гПа}}. \quad (3)$$

Сочетание значений $-V_T^L$ и $-V_T^U$ (параметр $-V_T$), помещенное на специальные диаграммы (рис. 1), отражает термическую структуру центра циклона в радиусе 500 км. Линейная регрессия, соответствующая вертикальному профилю ΔZ в уравнениях (2) и (3), обеспечивает однозначную величину и знак для $-V_T$ (даже в нелинейных вертикальных профилях возмущения высоты), представляет в основном наклон профиля, который вычисляется в этих уравнениях.

Положительные значения $-V_T$ указывают на циклон с теплым ядром внутри слоя, а отрицательные – на циклон с холодным ядром. К слову, для тропического циклона с теплым ядром параметры $-V_T^L$ и $-V_T^U$ являются обязательно положительными (тепло во всей толще тропосферы). Для внетропического циклона с холодным ядром оба параметра обязательно отрицательные (холод во всей толще тропосферы). Однако в циклонах может наблюдаться холодное ядро в нижней, а теплое – в верхней тропосфере, и наоборот. Субтропические и гибридные циклоны имеют любые из четырех сочетаний обоих параметров.

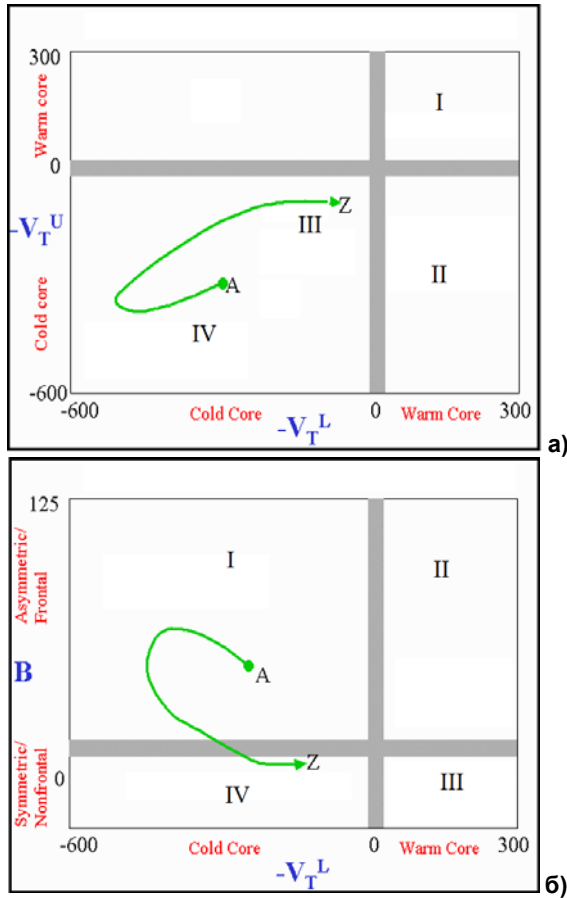


Рис. 1. Обобщенная картина закономерного расположения различных циклонов в определенных зонах на диаграммах по рассчитанным параметрам: термическая структура (I – тропические циклоны, II – субтропические циклоны и циклоны с теплым ядром, III – окклюдированные внетропические циклоны, IV – развивающиеся и зрелые внетропические циклоны) (а); асимметрия и термическое развитие в нижней тропосфере (I – развивающиеся и зрелые внетропические циклоны, II – гибридные циклоны, циклоны с теплым ядром, III – тропические циклоны и циклоны с теплым ядром, IV – окклюдированные внетропические циклоны) (б). Зеленой траекторией показано примерное развитие холодного асимметричного циклона.

Fig. 1. A generalized picture of the regular arrangement of various cyclones in certain zones on the diagrams according to the calculated parameters: thermal structure (I – tropical cyclones, II – subtropical cyclones and cyclones with a warm core, III – occluded extratropical cyclones, IV – developing and mature extratropical cyclones) (a); asymmetry and thermal development in the lower troposphere (I – developing and mature extratropical cyclones, II – hybrid cyclones, cyclones with a warm core, III – tropical cyclones and cyclones with a warm core, IV – occluded extratropical cyclones) (b). The green trajectory shows the approximate development of a cold asymmetric cyclone.

Более низкие температуры воздуха вблизи тропопаузы (параметр $-V_T^U$) по сравнению с окружающей средой (атмосфера за радиусом 500 км) влекут за собой уменьшение плотности воздуха в течение некоторого времени в нижележащих слоях, и наоборот. Разность высот в центральной части циклона (параметр $-V_T$), вертикальный профиль возмущения высоты ΔZ и термический ветер (ветер, обусловленный разностью геопотенциальных высот) будут сообщать о внутренних процессах, которые изменяют структуру циклонического вихря и его интенсивность. Следуя уравнениям (2) и (3), холодное ядро в нижней тропосфере указывает на волновую структуру циклона, который имеет большую амплитуду геопотенциальной высоты в верхней части тропосферы, чем в нижней, а теплое ядро в нижней тропосфере указывает на возмущение геопотенциальной высоты большее, чем в верхней. Строго определенное сочетание рассчитанных параметров указывает на возможность образования теплового ядра в тропосфере.

Определенным стадиям развития циклонов, как правило, соответствуют определенные зоны на диаграмме, которые отражают термическую структуру и асимметрию циклонов. По многочисленным исследованиям автора [13] была получена обобщающая статистическая картина расположения циклонических вихрей (в зависимости от описанных выше трех параметров) в той или иной зоне диаграмм (рис. 1).

Анализ результатов

На первом этапе исследования были построены траектории 363 интенсивных циклонов за зиму с 1996 по 2018 г. Отдельно рассмотрены субтропические и внетропические циклоны.

Субтропические циклоны зарождались в субтропической зоне СЗТО как обычные внетропические (с холодным ядром) и смещались в северо-восточном, восточном направлениях. В течение некоторого времени циклоны достигали стадии максимального развития, давление понижалось до 980–935 гПа, замкнутая циркуляция прослеживалась до 500 гПа (иногда 300 гПа), диаметр составлял около или более 2 тыс. км, а скорость ветра в области циклонов достигала 30–50 м/с. Это приводило к опасным и стихийным погодным явлениям на побережье Охотского и Берингова морей, Японии, Курил. В Атлантике подобные циклоны, как было сказано выше, в стадии максимального развития принимают характер ураганов и именуется. За 1996–2018 гг. количество интенсивных субтропических циклонов над СЗТО составило 215.

На рис. 2 в качестве примера приведены расчеты параметра «В» и термического ветра для двух субтропических циклонов, зародившихся недалеко от Тайваня в январе 2009 и 2010 гг. В начале своего развития, судя по параметру «В» (верхний левый квадрант рис. 2а), эти циклоны представляли собой холодные асимметричные образования. Для первого циклона «В» составляет 25, а для второго – 60 гп. м.

Первый циклон зародился 30 января 2009 г. в субтропиках (на широте 30° с. ш.) под высотной фронтальной зоной, давление в центре составляло 1009,5 гПа. Через двое суток углубление циклона носило взрывной характер (давление за 12 ч понизилось на 15,3 гПа); затем через 12 ч, согласно рассчитанным параметрам, вихрь становится теплым в нижней тропосфере (рис. 2в), но еще не симметричным (рис. 2а). По мере развития за счет скрытого тепла конденсации в верхней части тропосферы появляется теплое ядро и циклон на четвертые сутки (3 февраля 2009 г.) становится теплым, термически симметричным барическим образованием (рис. 2в) с минимальным давлением 951,2 гПа. В дальнейшем циклон смещался в северо-восточном направлении и с давлением 974 гПа на шестые сутки влился в алеутскую депрессию.

Второй циклон зародился 31 января 2010 г. южнее Японии, давление в центре составляло 1012 гПа. Спустя сутки давление резко упало на 11,5 гПа (987 гПа) и через 12 ч (2 февраля) в нижней тропосфере образовалось теплое ядро (рис. 2г), но вихрь оставался асимметричным (рис. 2б). По мере продвижения в северо-восточном направлении давление в центре понижалось, что способствовало образованию теплового ядра в верхней тропосфере. Следуя диаграмме (рис. 2г), 3 февраля циклон становится теплым и симметричным.

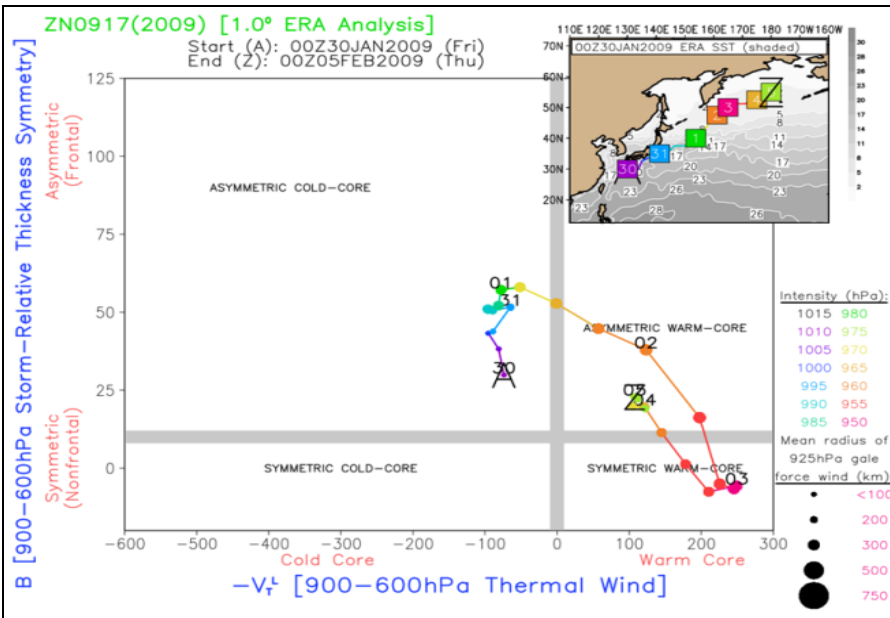


Рис. 2а.

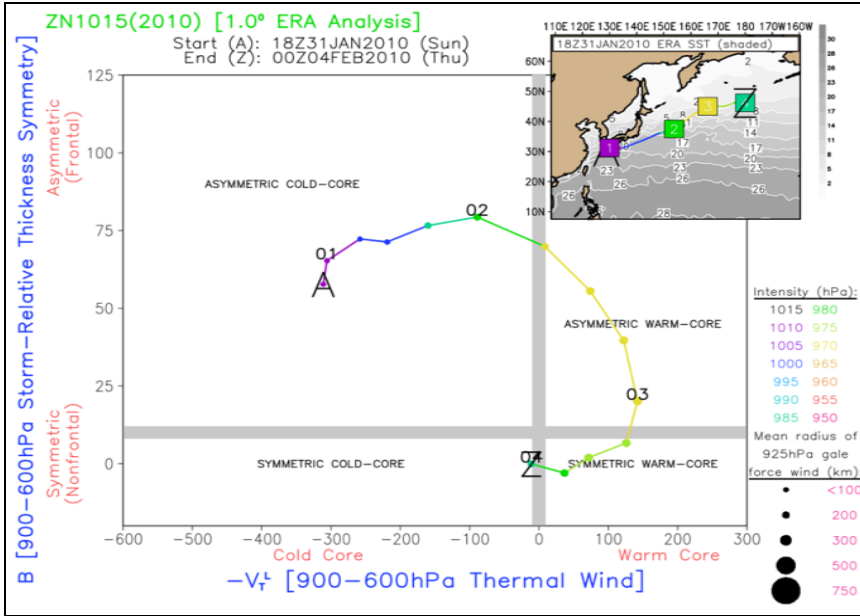


Рис. 26.

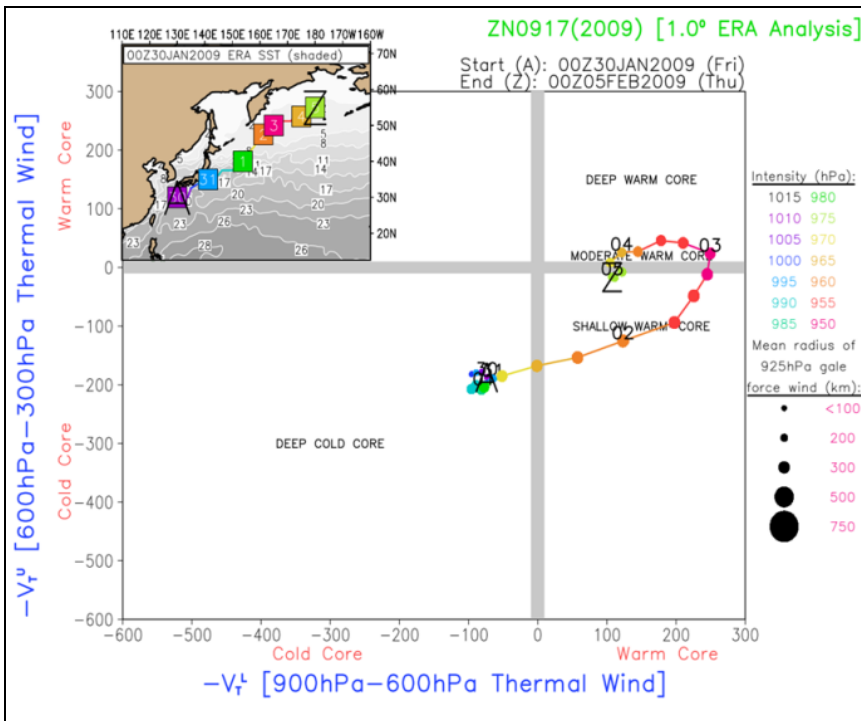


Рис. 2B.

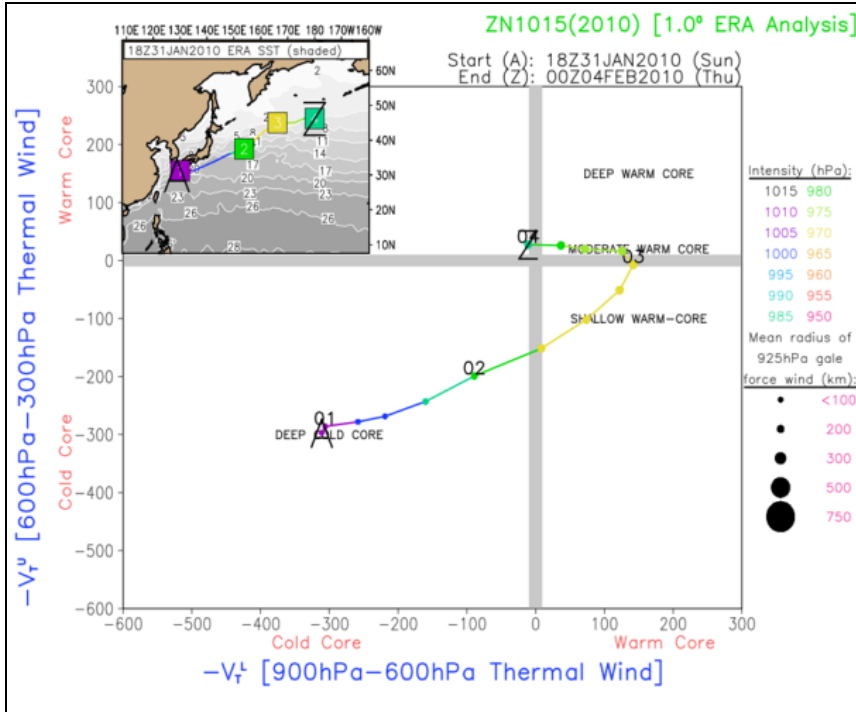


Рис. 2г.

Рис. 2. Термическая структура и асимметрия субтропических циклонов, зародившихся 30.01.2009 и 31.01.2010. Показана симметрия центральной части циклона по разности относительных высот слоев 900-600 гПа (а, б) и 600-300 гПа (в, г) по направлению движения циклона в радиусе 500 км через каждые 6 ч. Точка А – начало жизненного цикла, Z – окончание жизненного цикла. Эти точки не обязательно являются точками образования и заполнения циклона («издержки» модели Р.Харта), но представляют собой начало и конец жизненного цикла вихря в доступном наборе данных и его географических границах в пределах реанализа. Трек циклона нанесен на вставку с отмеченными ежесуточными позициями. Цвет линий и маркеров (квадраты) соответствует интенсивности циклона в гПа: от самого слабого (черный) до самого глубокого (красный цвет). Размер радиуса сильного ветра на H_{925} указывается размером маркера (круг) через каждые 6 ч.

Fig. 2. The thermal structure and asymmetry of subtropical cyclones originating on January 30, 2009 and January 31, 2010. Show the symmetry of the central part of the cyclone in terms of the difference in the relative heights of the layers of 900-600 hPa (a, b) and 600-300 hPa (v, r) in the direction of the cyclone in a radius of 500 km every 6 hours. Point A is the beginning of the life cycle, Z is the end of the life cycle. These points are not necessarily the points of formation and filling of the cyclone ("costs" of the R. Hart model), but they represent the beginning and end of the vortex life cycle in the available data set and its geographical boundaries within the reanalysis. The cyclone track is applied to the insert with the marked daily positions. The color of the lines and markers (squares) corresponds to the cyclone intensity in hPa: from the weakest (black) to the deepest (red). The size of the radius of a strong wind on the H_{925} is indicated by the size of the marker (circle) every 6 hours.

Наглядно формирование теплового ядра можно проследить на картах относительной топографии, а также на картах AT_{500} . На рис. 3, вкладки (1) – (6), представлена схема формирования теплового ядра на AT_{500} .

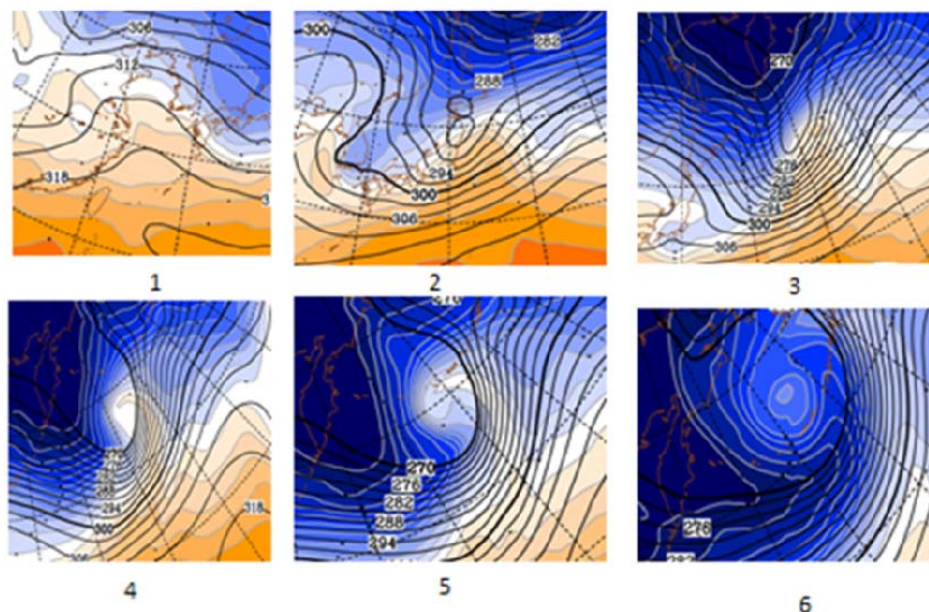


Рис 3. Схема физического процесса образования теплого ядра в средней тропосфере, составленная по модели HWRP на основе реанализа ERA INTERIM GFS. Черные линии – изогипсы на H500; цветная заливка – поле температуры воздуха на H500 через 4 °С. На вкладках (1) – (6) показана структура термобарического поля через каждые 3 ч.

Fig. 3. Scheme of the physical process of formation of a warm core in the middle troposphere, compiled according to the HWRP model based on the ERA INTERIM GFS reanalysis. Black lines - isohypses on H500; color fill – air temperature field at H500 through 4°C. Tabs 1–6 show the structure of the thermobaric field every 3 h.

На вкладке (1) мы видим возможное образование фронтальной волны, формирующейся под высотным термическим гребнем над Желтым морем. В дальнейшем под влиянием интенсивного затока холода с Японского и Охотского морей происходит обострение высотной фронтальной зоны, интенсивность которой достигает 30–36 дам/1000 км, вкладки (2) – (4). На вкладках (5) – (6) показано образование теплого ядра, окруженного более холодным воздухом спустя 15 ч от момента возникновения волны.

Интенсивные внетропические (гибридные) циклоны, количество которых составило 148, зарождались либо над морской поверхностью (132 случая), либо над материком (16 случаев). Континентальные циклоны при выходе на теплую морскую поверхность получают новую порцию тепла и влаги от теплой морской поверхности и, как правило, регенируют [8]. Некоторые из них проходят процесс взрывного циклогенеза. Количество таких циклонов за 1996–2018 гг. составило 16.

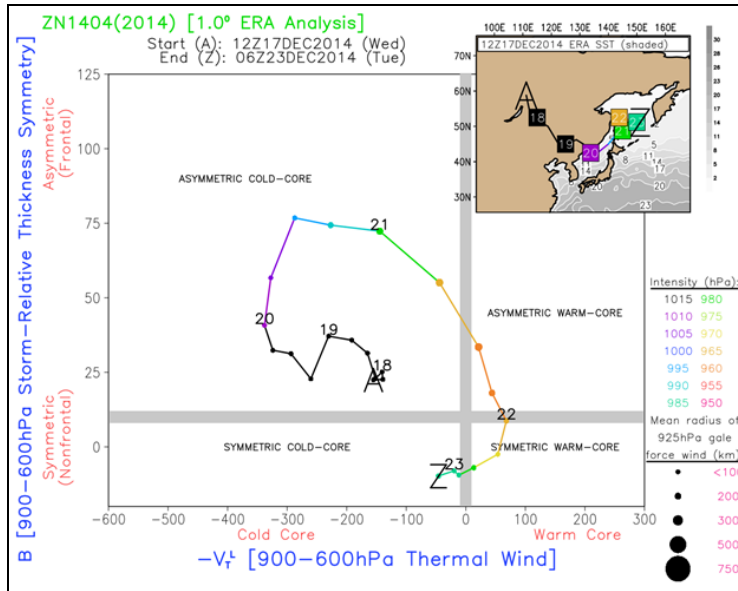
По методике Харта небольшая часть из них (6 случаев) имела теплое ядро в нижней и верхней тропосфере. В качестве примера такого случая приведены диаграммы изменения симметрии и термического развития циклона, возникшего восточнее Байкала 17 декабря 2014 г. с давлением в центре 1016 гПа (рис. 4). В течение двух суток циклон двигался по материку в юго-восточном направлении.

В этот период асимметрия вихря колебалась от 25 до 40 м (рис. 4а). 20 декабря циклон вышел в Японское море и начал интенсивно углубляться в течение суток (падение давления составило от 6 до 9 гПа за каждые 6 ч), но асимметрия вихря продолжала увеличиваться еще в течение следующих 12 ч, достигнув 75 м. В тыловой части циклона осуществился мощный заток холода, и спустя сутки давление в центре упало на 13 гПа (958 гПа). В результате турбулентного теплообмена между морской поверхностью и нижней тропосферой и поступления скрытого тепла конденсации, в верхней тропосфере 22 декабря образовалось теплое ядро во всей толще тропосферы (рис. 4б). В южной части Охотского моря вихрь стал симметричным (рис. 4а, б) и спустя некоторое время заполнился (23 декабря).

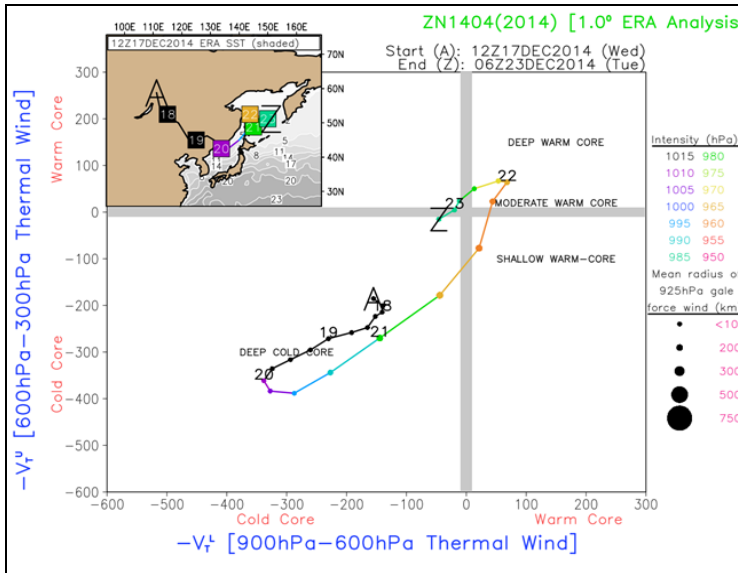
Внетропические циклоны (132 случая), которые зародились над морской поверхностью с более низкой температурой, чем в субтропической зоне, имеют отличительную динамику образования теплового ядра. Смещаясь в северо-восточном или восточном направлениях, циклоны интенсивно углубляются за счет адвекции холода с азиатского материка. Относительно теплый воздух в нижней тропосфере попадает в «ловушку» и остается в центре циклона. Дальнейший процесс развития теплового ядра циклона зависит от эволюции самого вихря. На рис. 5 показана схема развития морского циклона, возникшего над Японским морем 9 февраля 2005 года.

Циклон зародился в южной части Японского моря 9 февраля 2005 г. Асимметрия вихря составляла более 75 м (рис. 5а), что говорит о затоке холодного воздуха с запада, северо-запада к центру циклона. В течение 12 ч циклон пересек Японское море и вышел на СЗТО восточнее Японии, где оказался на более теплой подстилающей поверхности моря (10 декабря). Давление упало на 8 гПа и продолжало интенсивно понижаться, циклон стал смещаться в северо-восточном направлении. В процессе теплообмена с теплой морской поверхностью нижний слой тропосферы в центре циклона постепенно увеличивался, а асимметрия вихря уменьшалась. Южнее полуострова Камчатка давление в центре циклона резко упало на 13 гПа, а спустя 6 ч в нижней тропосфере образовалось теплое ядро. В следующие 12 ч за счет выделения скрытого тепла конденсации образовалось теплое ядро и в верхней тропосфере.

Все рассмотренные вихри (субтропические, гибридные и внетропические) прошли стадии развития от холодных асимметричных до теплых симметричных. Последняя стадия наступала севернее 40° с. ш.



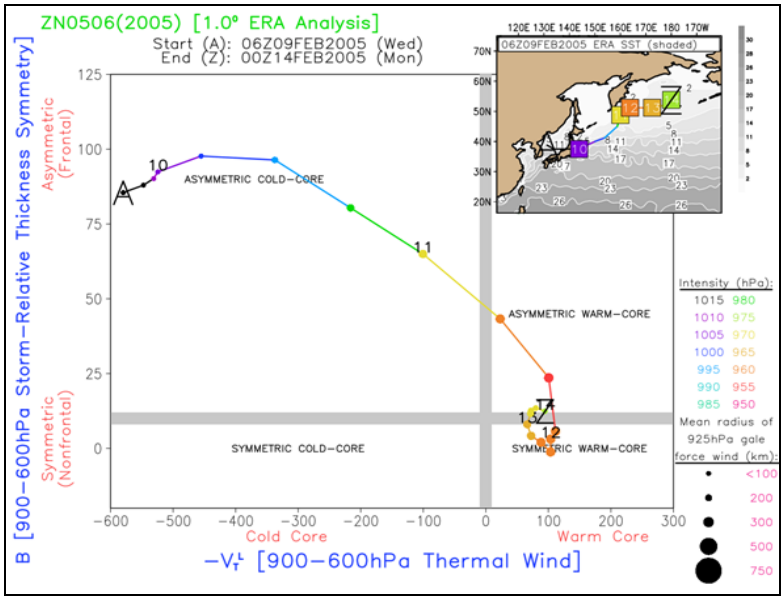
а)



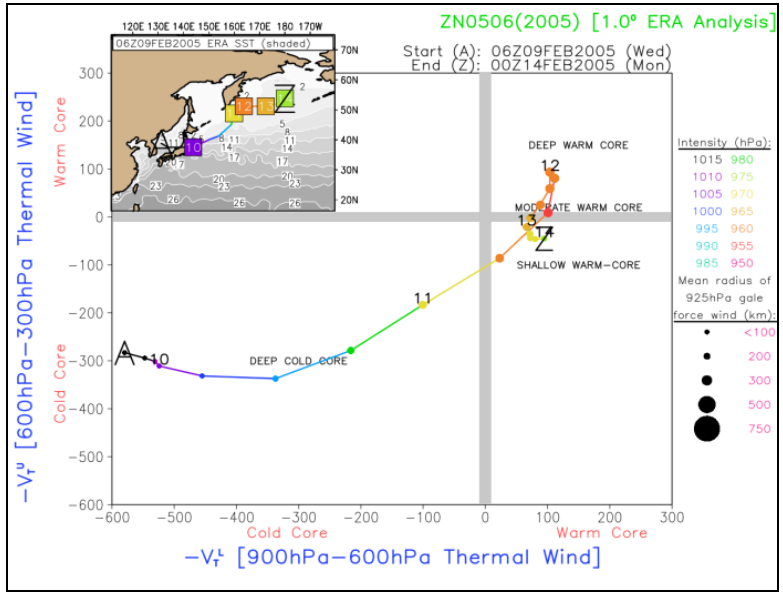
б)

Рис. 4. Термическая и вертикальная структура циклона, зародившегося 17 декабря 2017 г.: асимметрия вихря (а); термическая структура циклона в радиусе 500 км (б).

Fig. 4. Thermal and vertical structure of a cyclone that arose on December 17, 2017: vortex asymmetry (а); thermal structure of a cyclone within a radius of 500 km (б).



a)



b)

Рис. 5. Развитие морского циклона: асимметрия вихря (а); термическая структура центра циклона в радиусе 500 км (б).
Fig. 5. Development of a marine cyclone: vortex asymmetry (a); thermal structure of the center of the cyclone in a radius of 500 km (b).

Заключение

Исследование термической и вертикальной структуры 368 интенсивных зимних циклонов над северо-западной частью Тихого океана за 1996–2018 гг. производилось по методике Р. Харта. Отдельно рассмотрены субтропические и внетропические циклоны, названные нами гибридными. Отличительной особенностью этих вихрей является наличие теплого ядра, которое обусловлено взрывным характером развития циклонов, вызывающих опасные гидрометеорологические явления. Именно по методике Р. Харта возможно определить наличие и эволюцию теплого ядра на основе использования современных численных моделей, в частности HWRf.

Полученные в работе результаты апробации методики определения вертикальной структуры циклонов, которая широко используется над Атлантикой, показали состоятельность ее применения для СЗТО. Она является дополнительным инструментом прогнозирования опасных и стихийных явлений погоды, увеличивая заблаговременность их предсказания до 3–4 суток.

Список литературы

1. *Агаркова А.П.* Выход южных циклонов к районам Камчатки в холодное время года. // Труды ДВНИГМИ. 1960. Вып. 10. С. 68-92.
2. *Аксарина Е.А.* Особенности синоптических процессов над Азией, вызывающих выход циклонов на Японское море // Труды ДВНИГМИ. 1965. Вып. 19. С. 124-137.
3. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
4. *Воронина В.Ф.* Режим циклонической деятельности в субарктической фронтальной зоне северо-западной части Тихого океана // Труды ДВНИГМИ. 1975. Вып. 46. С. 175-187.
5. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 711 с.
6. *Макиеров Ю.В.* Горизонтальная циркуляция Куроисио и прилегающие районы Тихого океана // Труды ГОИН. 1972. Вып. 106. С. 81-117.
7. *Нестеров Е.С.* Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М.: Гидрометцентр России, 2018. 104 с.
8. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 615 с.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 2. Вып. 5. Дальний Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 176 с.
10. *Тунеголовец В.П.* Климатические обобщения южных циклонов, выходящих на дальневосточные моря и северо-западную часть Тихого океана в холодный период года. // Труды ДВНИГМИ. 2009. Вып. 151. С. 109-126.
11. *Caruso S.J., Businger S.* Subtropical Cyclogenesis over the Central North Pacific // Wea. Forecast. 2006. Vol. 21. P. 193-205. DOI:10.1175/waf914.1
12. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P. и др.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553-597. DOI: 10.1002/qj.828
13. *Evans J.L., Hart R.E.* Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones // Mon. Wea. Rev. 2003. Vol. 131. P. 909-925.
14. *Frank W.M., Ritchie E.A.* Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes // Mon. Wea. Rev. 2011. Vol. 29. P. 2249-2269.

15. *González-Alemán J.J., Valero F, Martín-León F., Evans J.L.* Classification and Synoptic Analysis of Subtropical Cyclones within the Northeastern Atlantic Ocean // *J. Climate*. 2015 American Meteorological Society. URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-14-00276.1>
16. *Gray W.M.* Global view of the origin of tropical disturbances and storms // *Mon. Wea. Rev.* 1968. Vol. 96. P. 669-700.
17. *Guishard, M.P.* Atlantic subtropical storms: climatology and characteristics. PhD Thesis, Department of Meteorology, Pennsylvania State University, 2006. 158 pp.
18. *Gulev S.K., Solina O., Grigoriev S.* Extratropical cycione variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // *Climate Dynamics*. 2001. Vol. 17. P. 795-809.
19. *Harr P.A., Elsberry R.L.* Extratropical transition of tropical cyclones over the western north Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process // *Mon. Wea. Rev.* 2000. Vol. 128. P. 2613-2633.
20. *Hart R.E.* A Cyclone phase sace derived from thermal wind and thermal asymmetry // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 585-616.
21. *Hart R.E., Evans J.L.* A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones // *J. Climate*. 2001. Vol. 14. P. 546-564.
22. *Hawkins J.D., Helveston M., Lee T.F., Turk F.J., Richardson K., Sampson C., Kent J., Wade R.* Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. Proc. Preprints, 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterrey, CA, Amer. Meteor. Soc., 2006. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/108864.pdf>.
23. *Kiladis G.N., Wheeler M.* Horizontal and vertical structure of observed tropospheric equatorial Rossby waves // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 22981-22998.
24. *Klein P.M., Harr P.A., Elsberry R.L.* Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage // *Wea. Forecast*. 2000. Vol. 15. P. 373-395.
25. *Kossin J.P., Knapp K.R., Vimont D.J., Murnane R.J., Harper B.A.* A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. L04815.
26. *Kossin, J.P., Schubert W.H.* Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices // *J. Atmos. Sci.* 2001. Vol. 58. P. 2196-2209.
27. *Mauk R.G., Hobgood J.S.* Tropical Cyclone Formation in Environments with Cool SST and High Wind Shearover the Northeastern Atlantic Ocean // *Wea. Forecast*. 2012. Vol. 27, no 6. P. 1433-1448. DOI: 10.1175/WAF-D-11-00048.1.
28. *McTaggart-Cowan R., Bosart L.F., Gyakum J.R., Atallah E.H.* Hurricane Juan (2003). Part II: Forecasting and numerical simulation // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1748-1771.
29. *Molinari J., Vollaro D., Corbosiero K.L.* Tropical cyclone formation in a sheared environment: A case study // *J. Atmos. Sci.* 2004. Vol. 61. P. 2493-2509.
30. *Montgomery M.T., Bell M.M., Aberson S.D., Black M.L.* Hurricane Isabel, 2003: New insights into the physics of intense storms. Part I: Mean vortex structure and maximum intensity estimates // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2006: Vol. 87. P. 1335-1347.
31. *Persing J., Montgomery M.T.* Hurricane superintensity // *J. Atmos. Sci.* 2003. Vol. 60. P. 2349-2371.
32. *Ritchie E.A., Elsberry R.L.* Simulations of the transformation stage of the extratropical transition of tropical cyclones // *Mon. Wea. Rev.* 2001. Vol. 129. P. 1462-1480.
33. *Röbcke M.S., Jones C., Majewski D.* The extratropical transition of Hurricane Erin (2001): a potential vorticity perspective // *Meteorologische Zeitschrift*. 2004. Vol. 13. P. 511-525.
34. *Shapiro L.J., Willoughby H.E.* The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum // *J. Atmos. Sci.* 1982. Vol. 39. P. 378-394.
35. *Sinclair M.R.* Extratropical transition of southwest Pacific tropical cyclones. Part I: Climatology and mean structure changes // *Mon. Wea. Rev.* 2002. Vol. 130. P. 590-609.
36. *Wang Y., Wu C.C.* 2004: Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes—a review // *Meteor. Atmos. Phys.* Vol. 87. P. 257-278.

37. Yoshiike S., Kawamura R. Influence of wintertime large-scale circulation on the explosively developing cyclones over the western North Pacific and their downstream effects // *Geophysical Res.* 2009. Vol. 114, no. 13. DOI: 10.1029/2009JD011820

38. Zeng Z., Wang Y., Wu C.C. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity – An observational study // *Mon. Wea. Rev.* 2007. Vol. 35. P. 38-59.

References

1. Agarkova A.P. Vyhod yuzhnyh ciklonov k rayonam Kamchatki v holodnoe vremya goda. *Trudy DVNIGMI*, 1960, vol. 10, pp. 68-92. [in Russ.].

2. Aksarina E.A. Osobennosti sinopticheskikh processov nad Aziey, vyzvyvayushchih vyhod ciklonov na Yaponskoe more. *Trudy DVNIGMI*, 1965, vol. 19, pp. 124-137. [in Russ.].

3. Vorob'ev V.I. Sinopticheskaya meteorologiya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1991, 616 p.

4. Voronina V.F. Rezhim ciklonicheskoy deyatel'nosti v subarkticheskoy frontal'noy zone severo-zapadnoy chasti Tihogo okeana. *Trudy DVNIGMI*, 1975, vol. 46, pp. 175-187 [in Russ.].

5. Zverev A.S. Sinopticheskaya meteorologiya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, 711 p.

6. Makerov Yu.V. Gorizontalnaya cirkulyaciya Kuroshio i prilgayushchie rayony Tihogo okeana. *Trudy GOIN*, 1972, vol. 106, pp. 81-117 [in Russ.].

7. Nesterov E.S. Ekstremal'nye ciklony v atlantiko-evropeyskom regione. Moscow, Hydrometcenter of Russia, 2018, 104 p. [in Russ.].

8. Pal'men E., N'yuton Ch. Cirkulyacionnye sistemy atmosfery. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1973, 615 p.

9. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Ch. 2. Vyp. 5. Dal'niy Vostok. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1988, 176 p. [in Russ.].

10. Tunegolovec V.P. Klimaticheskie obobshcheniya yuzhnyh ciklonov, vyhodyashchih na dal'nevostochnye morya i severo-zapadnyuyu chast' Tihogo okeana v holodnyy period goda. *Trudy DVNIGMI*, 2009, vol. 151, pp. 109-126 [in Russ.].

11. Caruso S.J., Businger S. Subtropical Cyclogenesis over the Central North Pacific. *Wea. Forecast.*, 2006, vol. 21, pp. 193-205. DOI:10.1175/waf914.1.

12. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 553-597. DOI: 10.1002/qj.828

13. Evans J.L., Hart R.E. Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, vol. 131, pp. 909-925.

14. Frank W.M., Ritchie E.A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 29, pp. 2249-2269.

15. González-Alemán J.J., Valero F., Martín-León F., Evans J.L. Classification and Synoptic Analysis of Subtropical Cyclones within the Northeastern Atlantic Ocean. *J. Climate.*, 2015, vol. 28, pp. 3331–3352. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00276.1.

16. Gray W.M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1968, vol. 96, pp. 669-700.

17. Guishard M.P. Atlantic subtropical storms: climatology and characteristics. PhD Thesis, Department of Meteorology, Pennsylvania State University, 2006, 158 p.

18. Gulev S.K., Solina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, 2001, vol. 17, pp. 795-809.

19. Harr P.A., Elsberry R.L. Extratropical transition of tropical cyclones over the western north Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, pp. 2613-2633.

20. Hart R.E. A Cyclone phase sace derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, vol. 131, pp. 585-616.
21. Hart R.E., Evans J.L. A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate*, 2001, vol. 14, pp. 546-564.
22. Hawkins J.D., Helveston M., Lee T.F., Turk F.J., Richardson K., Sampson C., Kent J., Wade R. Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. Proc. Preprints, 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterrey, CA, Amer. Meteor. Soc., 2006. Available at: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/108864.pdf>.
23. Kiladis G.N., Wheeler M. Horizontal and vertical structure of observed tropospheric equatorial Rossby waves. *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 100, pp. 22981-22998.
24. Klein P.M., Harr P.A., Elsberry R.L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage. *Wea. Forecast.* 2000, vol. 15, pp. 373-395.
25. Kossin J.P., Knapp K.R., Vimont D.J., Murnane R.J., Harper B.A. A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, pp. L04815.
26. Kossin J.P., Schubert W.H. Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, 2001, vol. 58, pp. 2196-2209.
27. Mauk R.G., Hobgood J.S. Tropical Cyclone Formation in Environments with Cool SST and High Wind Shearover the Northeastern Atlantic Ocean. *Wea. Forecast.*, 2012, vol. 27, no. 6, pp. 1433-1448. DOI: 10.1175/WAF-D-11-00048.1.
28. McTaggart-Cowan R., Bosart L.F., Gyakum J.R., Atallah E.H. Hurricane Juan (2003). Part II: Forecasting and numerical simulation. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1748-1771.
29. Molinari J., Vollaro D., Corbosiero K.L. Tropical cyclone formation in a sheared environment: A case study. *J. Atmos. Sci.*, 2004, vol. 61, pp. 2493-2509.
30. Montgomery M.T., Bell M.M., Aberson S.D., Black M.L. Hurricane Isabel, 2003: New insights into the physics of intense storms. Part I: Mean vortex structure and maximum intensity estimates // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2006, vol. 87, pp. 1335-1347.
31. Persing J., Montgomery M.T. Hurricane superintensity. *J. Atmos. Sci.*, 2003, vol. 60, pp. 2349-2371.
32. Ritchie E.A., Elsberry R.L. Simulations of the transformation stage of the extratropical transition of tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, vol. 129, pp. 1462-1480.
33. Röbcke M.S., Jones C., Majewski D. The extratropical transition of Hurricane Erin (2001): a potential vorticity perspective. *Meteorologische Zeitschrift*, 2004, vol. 13, pp. 511-525.
34. Shapiro L.J., Willoughby H.E. The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, 1982, vol. 39, pp. 378-394.
35. Sinclair M.R. Extratropical transition of southwest Pacific tropical cyclones. Part I: Climatology and mean structure changes. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, vol. 130, pp. 590-609.
36. Wang Y., Wu C.C. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes – a review. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2004, vol. 87, pp. 257-278.
37. Yoshiike S., Kawamura R. Influence of wintertime large-scale circulation on the explosively developing cyclones over the western North Pacific and their downstream effects. *Geophysical Res.*, 2009, vol. 114, no. 13. DOI: 10.1029/2009JD011820.
38. Zeng Z., Wang Y., Wu C.C. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity – An observational study. *Mon. Wea. Rev.*, 2007, vol. 35, pp. 38-59.

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.

Received by the editor 18.11.2019.