

Мезомасштабный циклогенез над Японским морем. Часть I: количественные характеристики

И. А. Гурвич, М. К. Пичугин, Е. С. Хазанова

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия*

E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru, khazanova@poi.dvo.ru

Работа посвящена анализу мезоциклонической деятельности над Японским морем за 15 холодных сезонов (октябрь–апрель 2003–2018 гг.) на основе созданного архива изображений полярных мезоциклонов (ПМЦ) по данным спектрорадиометра MODIS со спутников Aqua и Terra. ПМЦ идентифицировались по форме облачной системы на видимых и инфракрасных спутниковых изображениях и подкреплялись спутниковыми оценками скорости ветра у морской поверхности. В среднем за холодный сезон над Японским морем возникает 35,5 ПМЦ. Мезоциклоническая деятельность заметно усиливается в декабре–феврале, когда формируется более 70 % всех мезоциклонов. Максимум повторяемости ПМЦ приходится на январь и составляет 10,5 ПМЦ. Его межгодовая изменчивость значительна и частично связана со смещением на декабрь в холодные сезоны 2003/2004–2007/2008 гг. Плотность пространственного распределения ПМЦ указывает на два основных очага мезоциклогенеза: в юго-западной и северной частях моря. В траекториях ПМЦ преобладает южная составляющая, на её долю приходится 60 % всех мезоциклонов. Выявлен колебательный характер межгодовой изменчивости мезоциклонической деятельности, который характеризуется высокой корреляцией между количеством ПМЦ и холодных вторжений. За два последних холодных сезона (2016/2017 и 2017/2018 гг.) замечена интенсификация мезомасштабного циклогенеза на фоне блокирующих процессов при положении тихоокеанского высотного гребня над Беринговым морем. Отмечена ценность созданного архива спутниковых изображений ПМЦ как инструмента верификации результатов статистических и климатологических исследований по данным реанализов, которые приобретают всё большее распространение.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, Японское море, мультисенсорные спутниковые измерения, холодные вторжения, блокирующий процесс, тихоокеанский высотный гребень

Одобрена к печати: 29.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-272-280

Введение

Полярными мезоциклонами (ПМЦ) называют интенсивные нефронтальные мезомасштабные конвективные вихри, которые возникают в холодном воздухе над морями высоких широт в тылу глубоких циклонов синоптического масштаба и существуют от нескольких часов до трёх суток (Rasmussen, Turner, 2003). Горизонтальные размеры ПМЦ могут достигать 1000 км в диаметре, однако, как правило, не превышают 200–600 км. Облачная система ПМЦ имеет форму запятой или спирали с безоблачным центром (глазом). Из-за специфического масштаба и короткого жизненного цикла ПМЦ не всегда удавалось обнаружить на картах приземного анализа, поэтому их активное изучение началось с появлением метеорологических спутников. С ПМЦ связаны угрозы мореплаванию и прибрежным районам из-за резкого и внезапного ухудшения погоды, поэтому их исследования вот уже более 50 лет не теряют своей актуальности.

Дальневосточные моря являются одним из регионов активного мезомасштабного циклогенеза в северном полушарии в холодное время года, включая Японское море, несмотря на его более южное географическое положение. Мезоциклоническая деятельность над Японским морем связана с зимним муссоном (Гурвич и др., 2010; Fu, 2000; Ninomiya, 1991; Tsuboki, Wakahama, 1992; Yanase et al., 2016). Вторжения холодной воздушной массы (холодные вторжения — ХВ) над ним в тылу глубоких внетропических циклонов очень интенсивны, особенно при меридиональном типе циркуляции (Руководство..., 1988). При соприкосновении

холодного сухого континентального воздуха с тёплой морской поверхностью взаимодействие между океаном и атмосферой интенсифицируется, неустойчивость пограничного слоя атмосферы возрастает, развивается упорядоченная конвекция, которая проявляется в формировании облачных ячеек, гряд и мезовихрей.

Основой климатологических и статистических исследований являются архивы спутниковых изображений идентифицированных ПМЦ, которые могут использоваться как для анализа, так и для верификации результатов, полученных из реанализов высокого разрешения. Так, ряд климатологических исследований мезоциклонической деятельности над Северной Атлантикой опирался на архив Норвежского метеорологического института (Rojo et al., 2015; Stoll et al., 2018). Архив состоит из списка ПМЦ в стадии максимального развития за период с сентября 1999 по май 2013 г., в котором указаны даты, координаты, при наличии данных — атмосферное давление в центре и максимальная скорость приводного ветра. К списку прилагаются изображения ПМЦ, полученные радиометром AVHRR со спутников серии NOAA, которые дополняются данными реанализов. Проводимые в университете Токио исследования по климатологии ПМЦ над Японским морем (Yanase et al., 2016) базировались на данных реанализа JRA-55. Для верификации идентифицированных ПМЦ за отдельные годы авторы использовали архив спутниковых изображений с ПМЦ над дальневосточными морями (Гурвич, 2013).

Взрывной характер формирования, специфические размеры и короткий жизненный цикл ПМЦ создают определённые трудности в прогнозировании связанных с ними опасных явлений погоды. Настоящее исследование направлено на получение сведений о внутригодовой и межгодовой изменчивости мезоциклонической активности над Японским морем, типичных траекториях ПМЦ, локализации очагов мезомасштабного циклогенеза. Основным источником данных является впервые созданный архив видимых и инфракрасных (ИК) спутниковых изображений с ПМЦ над Японским морем на всём протяжении их жизненного цикла за 15 холодных сезонов (октябрь — апрель) 2003—2018 гг. Архив создан по измерениям спектрорадиометра MODIS со спутников Aqua и Terra. Спутниковые изображения, которые по своей сути являются фактическими измерениями, обеспечивают достоверность полученных сведений, а 15-летний ряд наблюдений позволяет дать объективную оценку межгодовой изменчивости мезоциклонической деятельности и её связи с холодными вторжениями, что также можно отнести к достоинствам применённого к исследованию подхода.

Данные и методы

Исследования проводились на основе комплексного анализа мультисенсорных спутниковых измерений. По данным спектрорадиометра MODIS со спутников Terra и Aqua в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн был сформирован архив изображений идентифицированных ПМЦ за 15 холодных сезонов (октябрь — апрель) 2003—2018 гг., который использовался для статистического анализа мезоциклонической деятельности над Японским морем. Спутниковые изображения были получены с сайта Atmosphere Discipline Team Imager Products (<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/IMAGES/index.html>), где они находятся в свободном доступе. Для архива отбирались ПМЦ со скоростью приводного ветра от 12 м/с и выше. Нижний порог скорости ветра был выбран с учётом рисков эксплуатации малотоннажных рыбопромысловых и пассажирских судов при скорости ветра ≥ 12 м/с и высоте волн $\geq 1,5$ м (Глухов и др., 2014; Руководство..., 2018). ПМЦ идентифицировались визуально по форме облачной системы на спутниковых изображениях. Для оценки их интенсивности использовались поля приводного ветра по измерениям скаттерометров ASCAT со спутников MetOp-A/B и SeaWinds со спутника QuikSCAT. Ценность подобного подхода состоит как в высокой степени достоверности статистических оценок, которая обеспечена фактическими спутниковыми измерениями, так и в возможности использовать архив для верификации дальнейших климатологических исследований на основе реанализов высокого разрешения.

Для построения траекторий и карт плотности пространственного распределения ПМЦ с видимых и ИК-изображений MODIS вручную снимались координаты их центров на всём

протяжении жизненного цикла. За плотность пространственного распределения принималось суммарное количество ПМЦ в начальной стадии развития (в момент обнаружения на спутниковом изображении) в квадрате $1 \times 1^\circ$ за весь период исследования. Очаги мезоциклогенеза идентифицировались как области максимальной плотности пространственного распределения ПМЦ.

Условия формирования и развития ПМЦ оценивались по синоптическим картам приземного анализа и барической топографии Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency — JMA) для северо-западной части Тихого океана. Структура термобарических полей тропосферы при различных типах атмосферной циркуляции анализировалась по картам геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (AT500) северного полушария JMA. Для выявления условий интенсификации мезоциклонической активности над Японским морем был рассмотрен внутрисезонный ход повторяемости ПМЦ N_{10} за каждую декаду (10 сут) с шагом 12 ч. Выбранный 10-дневный размер «скользящего окна» соответствует максимальному естественному синоптическому периоду, в течение которого над морем, как правило, возникал хотя бы один ПМЦ в декабре — январе, когда их повторяемость высока (Гурвич, 2013; Watanabe et al., 2016; Yanase et al., 2016). Значение, превышающее осреднённое за декабрь и январь 2003–2018 гг. на среднеквадратическое отклонение, принято в качестве порогового, выше которого мезоциклоническая деятельность считается авторами высокой. Это позволило выделить периоды роста количества ПМЦ и построить декадные карты AT500 для северо-западной части Тихого океана. Карты строились по данным реанализа Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) прогностического центра National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (за 7 холодных сезонов 2003/2004–2009/2010 гг.) и оперативного анализа системы прогноза климата Climate Forecast System, Version 2 (CFSv2) (за 8 холодных сезонов 2010/2011–2017/2018 гг.) в узлах регулярной сетки $\sim 0,3 \times 0,3$ и $\sim 0,2 \times 0,2^\circ$ соответственно. На рис. 1 приведён пример изменчивости повторяемости ПМЦ с 1 октября 2016 г. по 30 апреля 2017 г. Горизонтальная линия проведена на уровне порогового значения ($\sim 0,6$ ПМЦ в сутки), выше которого N_{10} считается высокой. Из рисунка видно, что рост ПМЦ приходится на середину января с максимумом повторяемости $1,3 \text{ сут}^{-1}$ за период 13–22 января 2017 г.

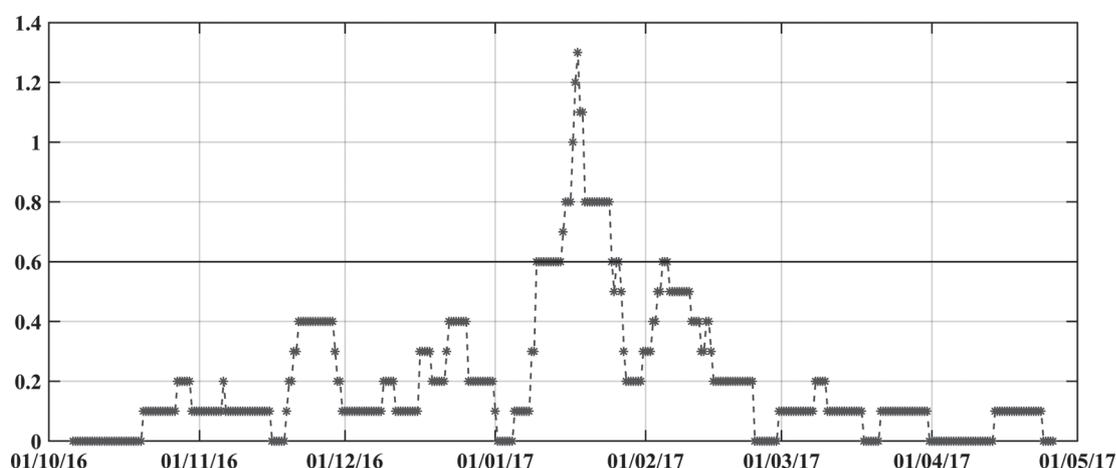


Рис. 1. Временная изменчивость частоты возникновения ПМЦ (сут^{-1}) над Японским морем за каждые 10 сут с 1 октября 2016 г. по 30 апреля 2017 г. Шаг по времени составляет 12 ч. Горизонтальной линией отмечен уровень, выше которого мезоциклоническая деятельность считается высокой

Характеристики мезоциклонической деятельности над Японским морем

В результате статистической обработки архива видимых и ИК-изображений MODIS с ПМЦ за 15 холодных сезонов были получены временные и пространственные характеристики мезоциклонической деятельности над Японским морем.

Временные характеристики мезоциклонической деятельности

Анализ архива показал, что за холодный сезон над Японским морем регистрируется в среднем 35,5 ПМЦ со скоростью ветра ≥ 12 м/с. Мезоциклоническая деятельность заметно активизируется в зимние месяцы (декабрь – февраль), когда при благоприятных условиях формируется более 70 % всех мезоциклонов (рис. 2а). В среднем пик повторяемости ПМЦ приходится на январь и составляет 10,5 ПМЦ, что на 20 % выше оценок, полученных на основе модельных данных за 36 холодных сезонов (Yanase et al., 2016). Вместе с тем его межгодовая изменчивость значительна (среднеквадратическое отклонение — 2,6) и демонстрирует смещение с декабря (2003/2004–2007/2008) на январь (2008/2009–2017/2018). Примечательно, что в холодные сезоны 2015/2016–2017/2018 гг. заметно усилилась мезоциклоническая деятельность в феврале. Она достигла своего максимума в 2018 г. — 10 ПМЦ.

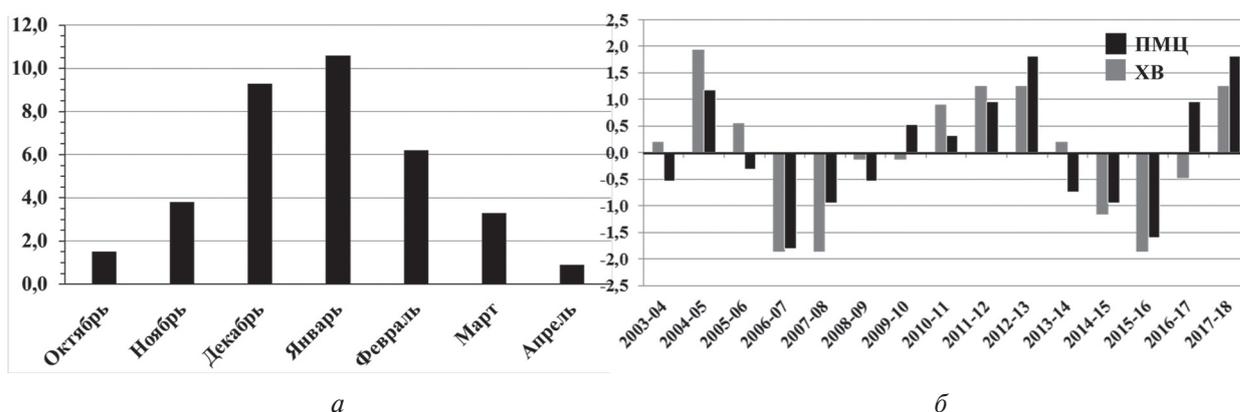


Рис. 2. Внутригодовая (а) и межгодовая (б) изменчивость количества полярных мезоциклонов за период 2003–2018 гг. Общее количество полярных мезоциклонов — 533, усреднённое за сезон — 35,5. На рис. 2б показаны аномалии полярных мезоциклонов (чёрный цвет) и холодных вторжений (серый цвет), нормированные к среднеквадратическому отклонению. Коэффициент корреляции $R = 0,82$

Межгодовая изменчивость аномалии количества ПМЦ (рис. 2б), нормированной на среднеквадратическое отклонение, характеризуется ярко выраженным колебанием с локальными максимумами в 2004/2005, 2012/2013 и 2017/2018 гг. и минимумами в 2007/2008 и 2015/2016 гг. и демонстрирует высокую корреляцию (коэффициент корреляции $R = 0,82$) с повторяемостью холодных вторжений (Пичугин, Чечин, 2016). Статистически значимая связь (уровень значимости $\alpha = 0,01$) позволяет предположить, что на повторяемость ПМЦ определяющее влияние оказывают изменения характеристик основных центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона (сибирского максимума и алеутской депрессии).

Крупномасштабная атмосферная циркуляция оказывает ключевое влияние на мезомасштабный циклогенез (Blechschmidt et al., 2009; Rojo et al., 2015). На рис. 3а показано типичное положение тропосферной ложбины и холодной высотной депрессии, наиболее благоприятное для мезоциклонеза над северо-западной частью Тихого океана (Ninomiya, 1991; Ninomiya et al., 1993). При такой структуре высотного поля алеутская депрессия занимает обычное зимнее положение с центром над Алеутскими островами. В целом влияния блокирующих процессов на мезоциклоническую активность выявлено не было. Тем не менее анализ двух последних холодных сезонов показал, что в январе 2017 и 2018 гг. рост мезоциклонической активности наблюдался на фоне блокирующего процесса при локализации тихоокеанского высотного гребня над Беринговым морем (рис. 3б). Так, за выбранные декады 8–17 января 2017 г. и 21–30 января 2018 г. над южной частью Японского моря по данным MODIS было зарегистрировано 10 и 7 ПМЦ соответственно. Можно предположить, что аномально продолжительные холодные вторжения на фоне длительно стационарирующих блокирующих процессов влияют на обострение мезомасштабного циклогенеза.

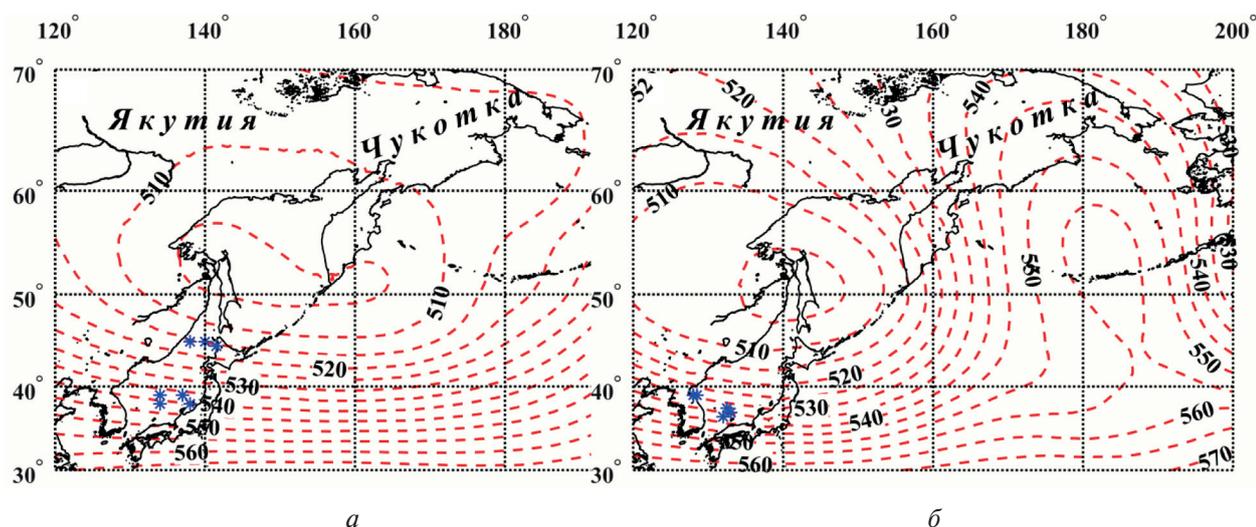


Рис. 3. Декадные поля геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (AT500) за 6–15 января 2013 г. (а) и 21–30 января 2018 г. (б). Синими звёздочками обозначено положение полярных мезоциклонов в начальной стадии развития

В связи с вышесказанным анализ вклада арктического колебания, проявляющегося в вариациях разности атмосферного давления в высоких и умеренных широтах северного полушария и отражающего интенсивность западного переноса, а также отмеченного роста мезоциклонической активности на фоне блокирующего процесса, является предметом дальнейших исследований, которые будут продолжаться по мере пополнения архива спутниковых изображений.

Пространственные характеристики мезоциклонической деятельности

Важным результатом исследования является определение географического положения очагов мезомасштабного циклогенеза, которые были выделены по повышенным значениям на карте плотности пространственного распределения ПМЦ (рис. 4а, см. с. 277). Из анализа карты видно, что основные очаги мезоциклогенеза локализуются в юго-западной и северной частях Японского моря. Над юго-западной частью моря большую часть ПМЦ (до 38 ПМЦ на градусный квадрат за исследуемый период) генерирует так называемая зона конвергенции полярных воздушных масс JPCZ (Japan sea Polar air mass Convergence Zone), которая формируется с подветренной стороны г. Чанбайшань в результате блокирующего эффекта. По данным опубликованных исследований (Fu, 2000; Tsuboki, Asai, 2004), в зоне конвергенции формируются цепочки волновых мезовихрей, доминирующим механизмом развития которых является баротропная неустойчивость при большом горизонтальном сдвиге ветра. Очаг мезоциклогенеза над северной частью моря (до 21 ПМЦ на градусный квадрат за исследуемый период) связан с зоной конвергенции северо-восточных и северо-западных воздушных потоков к западу от Хоккайдо, которая формируется в тылу циклонов синоптического масштаба при их перемещении к Берингову морю (Fu, 2000; Ninomiya, 1991; Tsuboki, Wakahama, 1992).

Не менее важной характеристикой мезоциклонической деятельности над Японским морем являются полученные в результате анализа архива спутниковых изображений типичные траектории ПМЦ. Установлено, что в траекториях 60 % всех ПМЦ над Японским морем преобладает южная составляющая (синие линии на рис. 4б). На долю траекторий с доминированием северной составляющей приходится 17 %. К остальным (23 %) относятся стационарные и существующие менее 0,5 сут ПМЦ. Над южной частью моря ПМЦ перемещаются на юго-восток под зональным переносом умеренных широт; над северной частью — на юг под северным потоком в нижней тропосфере в тылу циклонов синоптического масштаба.

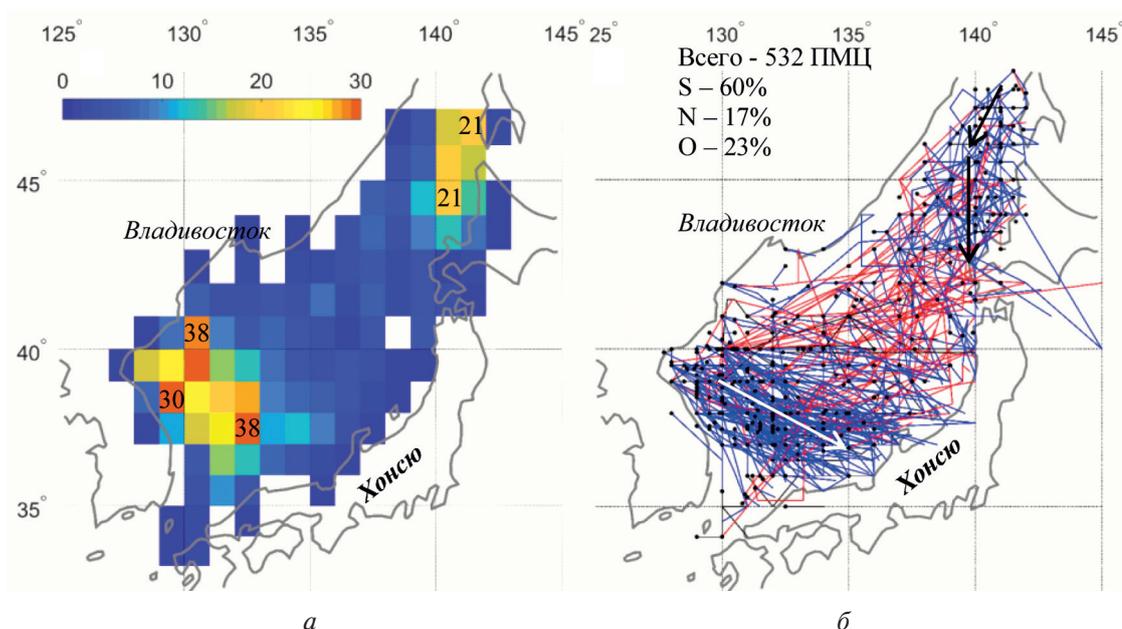


Рис. 4. Плотность распределения ПМЦ на сетке $1 \times 1^\circ$ в начальной стадии развития (а) и их траектории (синий цвет — с южной составляющей, красный — с северной) (б) за 15 холодных сезонов 2003–2018 гг. На рис. 4б: *S* — ПМЦ с южной составляющей, *N* — с северной составляющей, *O* — другие; белая стрелка — доминирующее направление перемещения полярных мезоциклонов в южной части моря, чёрные — в северной. Цифры на рис. 4а обозначают количество мезоциклонов в квадрате $1 \times 1^\circ$

Аналогичные выводы о направлениях перемещения ПМЦ были получены при использовании реанализа JRA-55 (Yanase et al., 2016).

Заключение

Связанные с полярными мезоциклонами риски для судоходства, рыболовства и прибрежной хозяйственной деятельности диктуют потребность в статистических и климатологических исследованиях мезомасштабного циклогенеза, особенно над дальневосточными морями, где он изучен меньше, чем над Северной Атлантикой. Достоинство полученных в настоящей работе статистических оценок мезоциклонической деятельности над Японским морем заключается в использовании фактических (спутниковых) измерений, на основе которых был создан архив идентифицированных полярных мезоциклонов, сформированный из видимых и ИК-изображений MODIS за 15 холодных сезонов. Недостатком применённого подхода является трудоёмкость и большие временные затраты ручной обработки данных. Однако архив имеет ценность и как инструмент верификации результатов статистических и климатологических исследований по данным реанализов, которые приобретают всё большее распространение.

Полученные оценки внутригодовой и межгодовой изменчивости мезоциклонической активности над Японским морем показали, что в среднем за сезон возникает 35,5 ПМЦ. Мезоциклоническая деятельность заметно усиливается в декабре – феврале, когда при благоприятных условиях формируется более 70 % всех мезоциклонов. Максимум повторяемости ПМЦ приходится на январь и составляет 10,5 ПМЦ. Вместе с тем его межгодовая изменчивость значительна (среднеквадратическое отклонение — 2,6) и частично связана со смещением на декабрь в холодные сезоны 2003/2004–2007/2008 гг.

Основные очаги мезоциклогенеза локализованы в юго-западной и северной частях моря. Максимальное количество ПМЦ формируется в зоне конвергенции JPCZ с подветренной стороны г. Чанбайшань (от 20 до 38 ПМЦ на градусный квадрат). В траекториях 60 % всех ПМЦ преобладает южная составляющая.

Мезоциклоническая деятельность имеет ярко выраженный колебательный характер с максимальной положительной аномалией в 2012/2013 и 2017/2018 гг. и показывает высокую корреляцию с повторяемостью холодных вторжений (коэффициент корреляции $R = 0,82$). Статистически значимая связь (уровень значимости $\alpha = 0,01$) позволяет допустить, что на повторяемость ПМЦ определяющее влияние оказывают изменения характеристик основных центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона. Отмеченный рост мезоциклонической активности на фоне блокирующего процесса при локализации тихоокеанского высотного гребня над Беринговым морем за два холодных сезона 2016/2017 и 2017/2018 гг. является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы, регистрационный номер: АААА-А17-117030110037-8.

Литература

1. Глухов В. Г., Гордиенко А. И., Шаронов А. Ю., Шматков В. А. Гидрометеорологическое обеспечение мореплавания: учебник / под ред. Шаронова А. Ю. СПб.: Гос. ун-т морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2014. 390 с.
2. Гурвич И. А. Интенсивные мезомасштабные циклоны над дальневосточными морями в холодное полугодие по данным спутникового зондирования: дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток, 2013. 171 с.
3. Гурвич И. А., Митник Л. М., Митник М. Л. Мезомасштабный циклогенез над Японским морем 7–13 января 2009 г. по спутниковым мультисенсорным данным // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 11–22.
4. Пичугин М. К., Чечин Д. Г. Межгодовая изменчивость характеристик холодных вторжений над Японским морем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 238–248.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. Вып. 5. Дальний Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 176 с.
6. Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию. ВМО, 2018. № 471. 80 с.
7. Blechschmidt A. M., Bakan S., Grabl H. Large-scale atmospheric circulation patterns during polar low events over the Nordic seas // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. D06115. DOI: 10.1029/2008JD010865.
8. Fu G. Polar Lows: Intense Cyclones in Winter. Qindao, China, 2000. 219 p.
9. Ninomiya K. Polar low development over the east coast of the Asian continent on 9–11 December 1985 // J. Meteorological Society of Japan. 1991. V. 69. No. 6. P. 669–685.
10. Ninomiya K., Wakahara K., Ohkubo H. Meso-a-scale low development over the northeastern Japan Sea under the influence of a parent large-scale low and a cold vortex aloft // J. Meteorological Society of Japan. 1993. V. 71. P. 73–91.
11. Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge: University Press, 2003. 612 p.
12. Rojo M., Claud C., Mallet P. E., Noer R. G., Carleton A. M., Vicomte M. Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis // Tellus A. 2015. V. 67. 24660. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.
13. Stoll P. J., Graversen R. G., Noer G., Hodges K. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2018. V. 144. P. 2099–2117.
14. Tsuboki K., Wakahama G. Mesoscale cyclogenesis in winter monsoon air streams: Quasi-geostrophic baroclinic instability as a mechanism of the cyclogenesis off the west coast of Hokkaido Island, Japan // J. Meteorological Society of Japan. 1992. V. 2. No. 1. P. 77–93.
15. Tsuboki K., Asai T. The multi-scale structure and development mechanism of mesoscale cyclones over the Sea of Japan in winter // J. Meteorological Society of Japan. 2004. V. 82. P. 597–621.
16. Watanabe S. I. I., Niino H., Yanase W. Climatology of Polar Mesocyclones over the Sea of Japan Using a New Objective Tracking Method // Monthly Weather Review. 2016. V. 144. No. 7. P. 2503–2515.
17. Yanase W., Niino H., Watanabe S. I. I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gурвич I. Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis // J. Climate. 2016. V. 29. No. 2. P. 419–437.

Mesoscale cyclogenesis over the Sea of Japan. Part I: quantitative characteristics

I. A. Gurvich, M. K. Pichugin, E. S. Khazanova

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru, khazanova@poi.dvo.ru

This paper analyses mesocyclones activities over the Sea of Japan for 15 cold seasons (October–April 2003–2018) using the archive of the polar mesocyclones (PMCs) images obtained by the MODIS spectroradiometer aboard the Aqua and Terra satellites. PMCs were identified from the cloud signatures on visible and infrared satellite images with the support of satellite measurements of ocean surface wind speed. On average, 35.5 PMCs occur over the Sea of Japan during the cold season. Mesocyclonic activity noticeably increases in December–February, when more than 70 % of all mesocyclones are formed. High repeatability, 10.5 PMCs, is registered in January. Its interannual variability is significant and partially related to the shift to December during the cold seasons 2003/2004–2007/2008. Distribution of the PMCs density is characterized by two main areas of mesocyclogenesis in the South-Western and Northern parts of the sea. Trajectories of PMCs with a southern component prevail and account for 60 % of all mesocyclones. The oscillatory nature of inter-annual variability was revealed, it's characterized by a high correlation between the number of PMCs and cold air-outbreaks. Intensification of mesoscale cyclogenesis was observed in the last two cold seasons (2016/2017 and 2017/2018) due to atmospheric blocking (AB). During AB the Pacific upper level ridge was located over the Bering Sea. It should be noted that the archive of satellite images of PMCs is a valuable tool for verifying the results of statistical and climatological reanalysis-based studies which are becoming increasingly common.

Keywords: polar mesocyclones, Sea of Japan, multisensor satellite measurements, cold air-outbreaks, blocking, Pacific upper level ridge

Accepted: 29.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-272-280

References

1. Glukhov V. G., Gordienko A. I., Sharonov A. Yu., Shmatkov V. A., *Gidrometeorologicheskoe obespechenie moreplavaniya* (Hydrometeorological support of navigation), Saint Petersburg: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2014, 390 p.
2. Gurvich I. A., *Intensivnye mezomasshtabnye tsyklony nad dal'nevostochnymi moryami v kholodnoe polugodie po dannym sputnikovogo zondirovaniya: dis. kand. geogr. nauk* (Intensive mesoscale cyclones over the Far Eastern seas in the cold half-year based on satellite remote sensing. Cand. geogr. sci. thesis), Vladivostok: POI FEB RAS, 2013, 171 p.
3. Gurvich I. A., Mitnik L. M., Mitnik M. L., *Mezomasshtabnyi tsiklogenez nad Yaponskim morem 7–13 yanvarya 2009 g. po sputnikovym mul'tisensornym dannym* (Mesoscale Cyclogenesis over the Japan Sea on 7–13 January 2009 from Satellite Multisensor Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 4, pp. 11–22.
4. Pichugin M. K., Chechin D. G., *Mezgodovaya izmenchivost' kharakteristik kholodnykh vtorzhenii nad Yaponskim morem* (Interannual variability in cold-air outbreak characteristics over the Sea of Japan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 238–248.
5. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody, Ch. II, Vyp. 5, Dal'nii Vostok* (Guide to short-term weather forecasts, Part II, Issue 5, Far East), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 176 p.
6. *Rukovodstvo po morskomu meteorologicheskomu obsluzhivaniyu* (Guide to marine meteorological services), World Meteorological Organization (WMO), No. 471, Geneva 2, Switzerland, 2018, 80 p.
7. Blechschmidt A. M., Bakan S., Grabl H., Large-scale atmospheric circulation patterns during polar low events over the Nordic seas, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, D06115, DOI: 10.1029/2008JD010865.
8. Fu G., *Polar Lows: Intense Cyclones in Winter*, Qindao, China, 2000, 219 p.
9. Ninomiya K., Polar low development over the east coast of the Asian continent on 9–11 December 1985, *J. Meteorological Society of Japan*, 1991, Vol. 69, No. 6, pp. 669–685.
10. Ninomiya K., Wakahara K., Ohkubo H., Meso-a-scale low development over the northeastern Japan Sea under the influence of a parent large-scale low and a cold vortex aloft, *J. Meteorological Society of Japan*, 1993, Vol. 71, pp. 73–91.

11. Rasmussen E., Turner J., *Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*, Cambridge: University Press, 2003, 612 p.
12. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., Noer R. G., Carleton A. M., Vicomte M., Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis, *Tellus A*, 2015, Vol. 67, 24660, available at: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.
13. Stoll P. J., Graverson R. G., Noer G., Hodges K., An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2018, Vol. 144, pp. 2099–2117.
14. Tsuboki K., Wakahama G., Mesoscale cyclogenesis in winter monsoon air streams: Quasi-geostrophic baroclinic instability as a mechanism of the cyclogenesis off the west coast of Hokkaido Island, Japan, *J. Meteorological Society of Japan*, 1992, Vol. 2, No. 1, pp. 77–93.
15. Tsuboki K., Asai T., The multi-scale structure and development mechanism of mesoscale cyclones over the Sea of Japan in winter, *J. Meteorological Society of Japan*, 2004, Vol. 82, pp. 597–621.
16. Watanabe S. I. I., Niino H., Yanase W., Climatology of Polar Mesocyclones over the Sea of Japan Using a New Objective Tracking Method, *Monthly Weather Review*, 2016, Vol. 144, No. 7, pp. 2503–2515.
17. Yanase W., Niino H., Watanabe S. I. I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gurvich I., Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis, *J. Climate*, 2016, Vol. 29, No. 2, pp. 419–437.