

Условия и механизмы мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем

И. А. Гурвич¹, Е. В. Заболотских², М. К. Пичугин¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева
ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, 195196, Россия
E-mail: liza@rshu.ru

Работа посвящена районированию и типизации условий и механизмов мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем. Исследование базировалось на комплексном использовании данных мультисенсорных спутниковых измерений и модели CFSv2 из оперативного анализа системы прогноза климата Climate Forecast System, Version 2 прогностического центра National Centers for Environmental Prediction (NCEP), дополненных синоптическими картами приземного анализа и барической топографии. Для идентификации полярных мезоциклонов (ПМЦ) по форме облачной системы использовались спутниковые видимые и инфракрасные изображения, полученные спектрометрией MODIS (спутники Aqua и Terra) и радиометром VIIRS (спутник Suomi NPP). По данным радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) восстанавливались поля паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра, для чего применялись алгоритмы, основанные на физическом моделировании радиояркостных температур уходящего излучения системы «океан–атмосфера» с последующим восстановлением геофизических параметров при помощи нейронных сетей. Проводился совместный анализ полей вектора приводного ветра по данным CFSv2 и скаттерометра ASCAT (спутники MetOp-A/B) за период сентябрь–декабрь 2016 г. Были выявлены четыре основных механизма мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем и прилегающей к нему с севера акваторией Северного Ледовитого океана: I — циклонический сдвиг ветра на оси барической ложбины; II — реверсивно-сдвиговые ПМЦ в зоне конвергенции воздушных потоков; III — подветренные ПМЦ под влиянием орографии п-ова Лисберн при северо-восточном направлении натекающего потока; IV — облачные запятые за холодным фронтом в тылу циклонов синоптического масштаба (вторичные вихри). Установлено, что орографический эффект проявляется при пересечении ПМЦ восточной оконечности о. Врангеля. Основным условием для возникновения и развития ПМЦ является наличие холодных высотных депрессий и мелких бароклинических зон в пограничном слое атмосферы, которые формируются в результате больших температурных контрастов вдоль кромок льда. Несмотря на низкое содержание водяного пара в облачности ПМЦ (4–8 кг/м²), они отчетливо выделяются в полях паросодержания атмосферы, что можно использовать для их идентификации наряду с полями приводного ветра и спутниковыми изображениями облачности.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, Чукотское море, спутники, мультисенсорные измерения, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, приводный ветер, ледяной покров

Одобрена к печати: 07.06.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-249-264

Введение

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) — это атмосферные вихри с облачной системой в форме запятной или спирали, которые возникают в холодном воздухе над морями высоких и умеренных широт. Наиболее интенсивные ПМЦ относятся к категории экстремальных морских погодных систем (Rasmussen, Turner, 2003). Из-за быстрого формирования и развития, специфических размеров (100–1000 км), короткого жизненного цикла (1–3 сут) и крайне редкой сети стандартных гидрометеорологических наблюдений над морями они не всегда фиксируются в поле давления на картах приземного анализа, но отчетливо видны на спутниковых видимых и инфракрасных (ИК) изображениях облачности, а также достаточно хорошо прослеживаются в полях интегрального паросодержания атмосферы и водозапаса облаков (Bobylev

et al., 2011). Наиболее эффективным инструментом для мониторинга и изучения ПМЦ является комплексное использование мультисенсорных спутниковых измерений и данных реанализов высокого разрешения.

Больше всего изучены ПМЦ над Северной Атлантикой и Баренцевым морем (Blechsmidt, 2008; Condron, Renfrew, 2012; Rojo et al., 2015; Zabolotskikh et al., 2017). Достаточно хорошо освещён мезомасштабный циклогенез над северо-западной частью Тихого океана, в частности над дальневосточными морями (Гурвич, Пичугин, 2013; Гурвич и др., 2008; Chen, von Storch, 2013; Fu, 2000; Mitnik, Gurvich, 2011; Ninomiya, 1989; Ninomiya et al., 1993, 2003; Shimada et al., 2014; Watanabe et al., 2016; Yanase et al., 2016). Восточная Арктика из-за незначительной межсезонной изменчивости площади ледяного покрова ранее считалась неблагоприятным регионом для мезоциклонической деятельности. Над морями Бофорта, Чукотским и Восточно-Сибирским анализировались отдельные случаи с ПМЦ (Rasmussen, Turner, 2003), однако их систематические исследования в восточном секторе Евразийской Арктики (ВЕА) не проводились. Сокращение ледяного покрова вызвало активизацию мезомасштабного циклогенеза в ВЕА (Гурвич, Заболотских, 2015; Гурвич и др., 2016; Заболотских и др., 2015; Gurvich et al., 2016; Zabolotskikh et al., 2016a, b), а интенсификация освоения Северного морского пути и добычи полезных ископаемых на арктическом шельфе привела к пониманию необходимости его систематического изучения.

Пик мезомасштабного циклогенеза в ВЕА приходится не на зимние месяцы (декабрь—январь), как в других регионах, а на осенние (октябрь). В ноябре из-за быстрого замерзания морей интенсивность мезоциклонической деятельности в регионе быстро ослабевает. Исключение составляет Чукотское море, где она наиболее продолжительна и может наблюдаться до середины декабря. Это обусловлено более поздним замерзанием моря из-за поступления относительно тёплых тихоокеанских вод через Берингов пролив.

Исследования, результаты которых отражены в многочисленных публикациях и обобщены в монографиях (Fu, 2000; Rasmussen, Turner, 2003), выявили основные районы, типичные траектории, условия и механизмы формирования ПМЦ в различных регионах мезомасштабного циклогенеза. Были получены статистические оценки их пространственного и временного распределения.

Целью данной работы является изучение и типизация условий и механизмов мезоциклонической деятельности над Чукотским морем в рамках исследований мезомасштабного циклогенеза над окраинными морями ВЕА. Одна из поставленных в работе задач — районирование зон мезомасштабного циклогенеза и выявление закономерностей в направлениях перемещения ПМЦ. Большое внимание уделялось прогностическим признакам вероятного образования мезоциклонических вихрей.

Данные и методика

Исследование базировалось на комплексном использовании данных мультисенсорных спутниковых измерений и модели CFSv2 из оперативного анализа системы прогноза климата Climate Forecast System, Version 2 прогностического центра National Centers for Environmental Prediction (NCEP) в узлах регулярной сетки $0,205 \times 0,204^\circ$. Использовались поля метеорологических параметров с почасовым шагом. Для анализа синоптических процессов применялись карты приземного анализа и барической топографии Национального климатического центра данных NOAA (NOAA's National Climatic Data Center — NCDC, <http://nomads.ncdc.noaa.gov> а также среднемесячные карты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (AT500) и приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным реанализа NCEP. Для идентификации ПМЦ в поле облачности использовались спутниковые видимые и инфракрасные (ИК) изображения, полученные спектрометрией MODIS, установленной на спутниках Aqua и Terra, b радиометром VIIRS со спутника Suomi NPP. Поля паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра восстанавливались по данным усовершенствованного микроволнового радиометра AMSR2 на спутнике GCOM-W1, для

чего применялись алгоритмы, основанные на физическом моделировании радиоярких температур уходящего излучения системы «океан – атмосфера» с последующим восстановлением геофизических параметров при помощи нейронных сетей (Zabolotskikh et al., 2013). При моделировании коэффициента излучения океана использовались современные геофизические модельные функции зависимости сигнала от приводного ветра, что позволило добиться высокой точности восстановления параметров атмосферы и океана во всём диапазоне изменчивости параметров, включая высокие скорости ветра. Для увеличения временного разрешения использовались также поля вектора ветра по данным скаттерометров ASCAT со спутников Metop-A/B.

Рассматривалась мезоциклоническая деятельность в ВЕА за период сентябрь – декабрь 2007, 2014 и 2016 гг. Для демонстрации условий и типичных механизмов мезомасштабного циклогенеза был произвольно выбран период сентябрь – декабрь 2016 г.

При анализе рассматривались те мезоциклоны, скорость ветра в которых превышала порог 12 м/с. Уменьшение пороговых значений со стандартных 15 м/с (Rasmussen, Turner, 2003) в ВЕА обусловлено меньшими значениями потоков тепла и в целом меньшей ожидаемой интенсивностью мезоциклонов (Zabolotskikh et al., 2016a).

Типичные механизмы мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем

Результатом многолетних систематических исследований полярных мезоциклонов по данным спутниковых видимых и ИК-изображений, которые обобщены в монографии (Rasmussen, Turner, 2003), явилась их типизация по форме облачной системы, условиям и механизмам формирования. В признанных регионах мезомасштабного циклогенеза значительная часть ПМЦ формируется на линии циклонического сдвига ветра вдоль оси барических ложбин, которые вытягиваются от циклонов синоптического масштаба. В ложбинах может развиваться семейство полярных циклонов. Ещё одна значимая группа полярных циклонов возникает в мелких бароклинных зонах — на так называемых фронтах пограничного слоя атмосферы вдоль холодного побережья или кромки льда (Terpstra et al., 2015). ПМЦ возникают в зонах конвергенции воздушных потоков пограничного слоя атмосферы, которые формируются с подветренной стороны гор или при постоянной адвекции холода от ледяных полей при благоприятной синоптической ситуации. Отдельное место занимают подветренные мезоциклоны, которые возникают под воздействием топографии побережья. За холодным фронтом в тылу циклонов синоптического масштаба довольно часто возникают вторичные вихри с облачной системой в форме запятой. Полярные циклоны образуются на старых фронтах окклюзии и в центральной части холодных окклюзированных циклонов (система «карусель»). Все основные типы мезоциклонов, которые обнаруживаются над Северной Атлантикой, характерны и для северо-западной части Тихого океана (Fu, 2000; Kolstad, 2006). В данной работе на примере мезоциклонической деятельности в период сентябрь – декабрь 2016 г. показаны четыре механизма мезомасштабного циклогенеза, характерные для Чукотского моря.

Совместный анализ полей вектора приводного ветра по данным модели CFSv2 и скаттерометра ASCAT (спутники MetOp-A/B) с наложенными на них полями приведённого к уровню моря атмосферного давления за период сентябрь – декабрь 2016 г. показал, что в 2016 г. над Чукотским морем наблюдалось 16 ПМЦ. Пик мезоциклонической активности приходился на ноябрь (8 ПМЦ), а не на октябрь, как в 2007 и 2014 гг. (Гурвич и др., 2016). В октябре над Чукотским морем наблюдалось 5 ПМЦ, в сентябре и декабре — 2 и 1 ПМЦ соответственно (рис. 1а). Как следует из анализа среднемесячных карт геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (AT500) и приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным реанализа NCEP (не представлены), смещение пика с октября на ноябрь было обусловлено характером крупномасштабной атмосферной циркуляции и гидрологическим режимом моря. В октябре 2016 г. Чукотское море находилось под воздействием адвекции тепла в системе глубоких берингоморских циклонов, а в ноябре в результате перестройки термо-

барического поля над бассейном Северного Ледовитого океана (СЛО) — под воздействием адвекции холода из приполюсных районов, что создавало предпосылки для активизации мезоциклонической деятельности. Большая часть акватории моря была свободна ото льда в течение первой декады декабря.

Детальный анализ структуры, траекторий, условий формирования и развития ПМЦ со скоростью ветра ≥ 2 м/с в октябре и ноябре 2016 г. показал, что для Чукотского моря характерны те же условия мезомасштабного циклогенеза, что и для других регионов. Типичные механизмы и основные районы мезоциклонической деятельности над Чукотским морем и прилегающей к нему с севера акваторией СЛО обусловлены крупномасштабными атмосферными процессами, ледовым режимом моря и орографией побережья. Большая часть ПМЦ возникает в мелких бароклинных зонах, формирующихся вдоль ледовых кромок. Постоянная адвекция холода от ледяных полей в результате температурных контрастов между льдом и открытой морской поверхностью, которая периодически усиливается холодными вторжениями в тылу циклонов синоптического масштаба, и вынос тепла в системе берингоморских циклонов приводят к тому, что ПМЦ возникают на цепочках бароклинных волн, называемых реверсивно-сдвиговыми зонами (Rasmussen, Turner, 2003). Ещё один распространённый механизм мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем — циклонический сдвиг ветра на оси приземных барических ложбин. ПМЦ начинают быстро развиваться, когда западная периферия вытянутой с востока приземной барической ложбины пересекает о. Врангеля, что свидетельствует о значимом вкладе орографии. ПМЦ образуются также под холодными высотными депрессиями при перемещении их на юг из приполюсных районов и выходе на свободную ото льда акваторию (такие процессы наблюдаются и над Японским морем) или начинают интенсивно развиваться, если попадают под влияние высотной депрессии. Облачные запятые за холодным фронтом возникают над северной частью моря или к северу от него, над свободной ото льда акваторией. «Хвост» запятых идентифицируется как вторичный холодный фронт, который является витком облачной спирали окклюдированного циклона синоптического масштаба.

Пространственное распределение и траектории ПМЦ показаны на *рис. 1б*. В отличие от регионов, где существуют чётко выраженные тренды направления перемещения ПМЦ, разнонаправленность их траекторий над Чукотским морем обусловлена разнообразием и сложностью синоптических процессов в Арктике (Зимич, 1998). Направление перемещения ПМЦ в каждом случае зависит от конкретной синоптической ситуации, которая определяет направление ведущего потока для ПМЦ. В некоторых случаях ПМЦ попадают под влияние разных синоптических объектов, и их траектория делает петлю аналогично траектории тропических циклонов в подобных ситуациях (пример будет рассмотрен ниже).

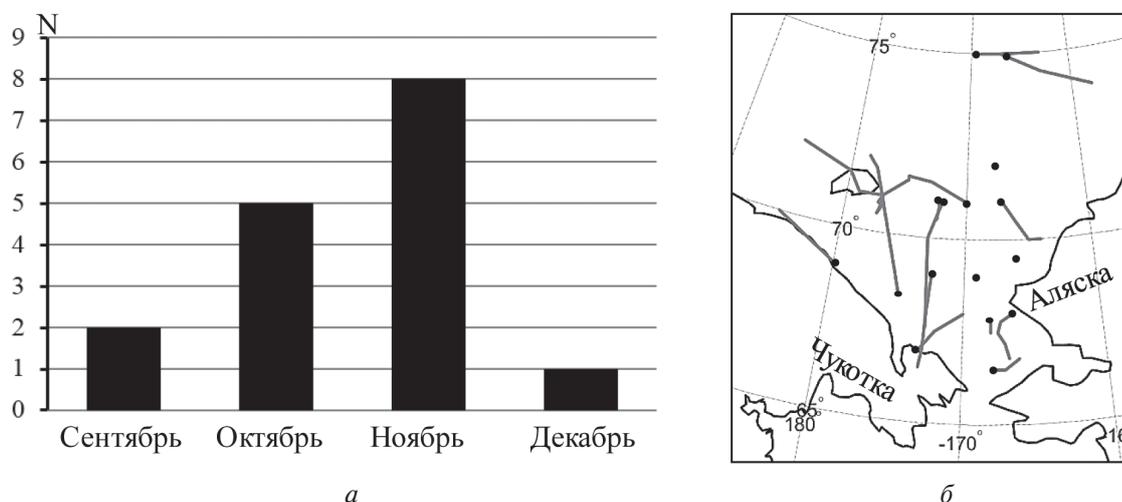


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость (*а*) и траектории (*б*) мезомасштабных циклонов. Чёрными точками на рисунке (*б*) обозначены начальные пункты траекторий мезоциклонов

Тип I. Циклонический сдвиг ветра на оси барической ложбины

На карте приземного анализа в 00:00 GMT 13 ноября 2016 г. (рис. 2а) на северной периферии глубокого циклона с центром над Тихим океаном фиксируется узкая барическая ложбина, ось которой вытянута по широте. Ложбина распространялась от побережья Аляски на запад вдоль кромки льда. На северной периферии ложбины, на границе между кромкой льда и морской поверхностью, сформировалась мелкая бароклинная зона. На рис. 2б показана начальная стадия развития ПМЦ в полях вектора приводного ветра и приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным климатической модели CFSv2. Зона максимальных ветров со скоростью 12–15 м/с локализована в юго-западном секторе развивающегося мезовихря.

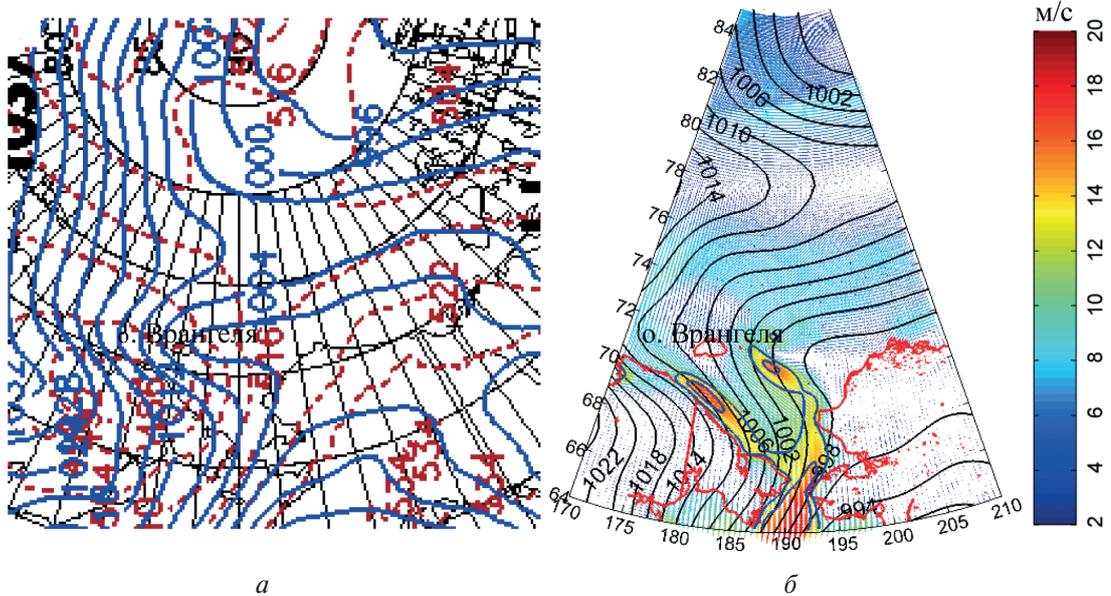


Рис. 2. Карта приземного анализа Национального климатического центра данных NOAA (NOAA's National Climatic Data Center — NCDC) в 00:00 GMT 13 ноября 2016 г. (а); поле приводного ветра и приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным климатической модели CFSv2 (б) в 17:00 GMT 12 ноября 2016 г.

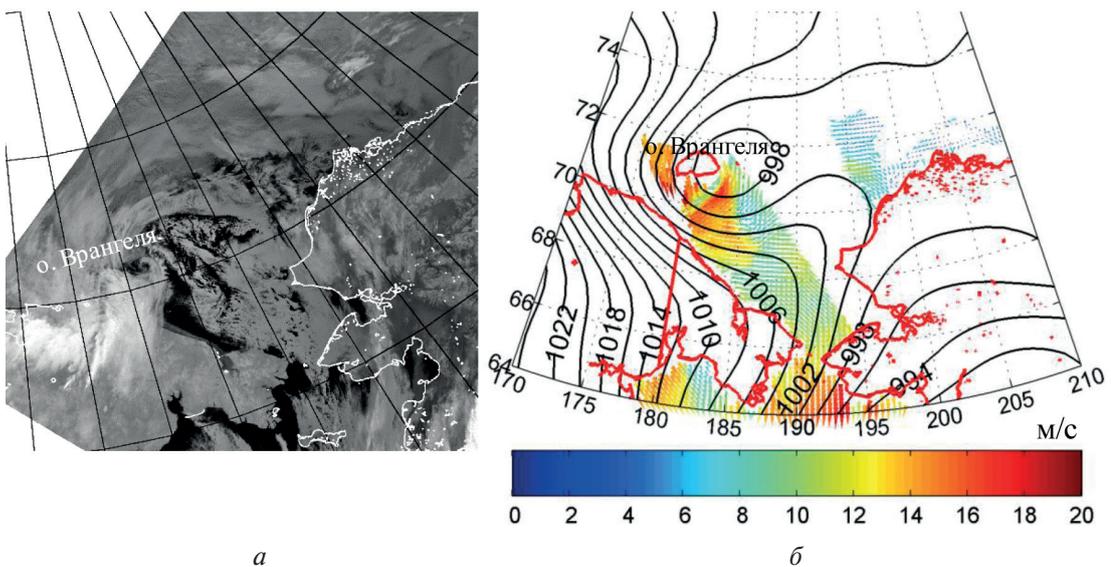


Рис. 3. Поля облачности по данным спектро радиометра MODIS (спутник Terra) в 07:40 GMT (а) и приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT (спутник MetOp) с наложенным полем приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным CFSv2 в 07:00 GMT (б) 13 ноября 2016 г.

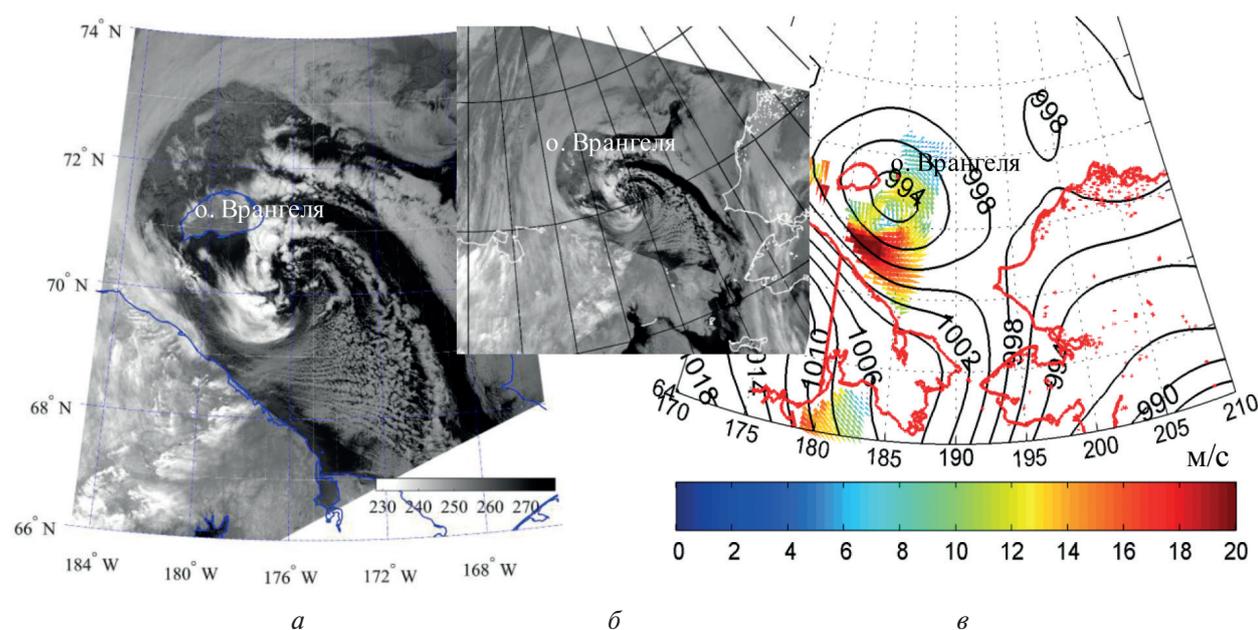


Рис. 4. ИК-изображения VIIRS (спутник Suomi NPP) в 23:14 GMT 13 ноября (а) и MODIS (спутник Terra) в 00:20 GMT 14 ноября 2016 г. (б); поле приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT (спутник MetOp) с наложенным полем приведённого к уровню моря атмосферного давления по данным CFSv2 (в) приблизительно в 22:00 GMT 13 ноября 2016 г.

Замкнутая мезоциклоническая циркуляция в поле вектора ветра по данным CFSv2 появилась на западной периферии ложбины при условном приближении изобары 1000 гПа к о. Врангеля, примерно в 00:01 GMT 13 ноября. При этом в поле облачности мезовихрь отсутствовал. ПМЦ начал интенсивно развиваться с подветренной стороны восточной оконечности о. Врангеля, где горный массив достигал высоты 500–1000 км. Мезоциклогенезу способствовало понижение рельефа (Зимич, 1998). На ИК-изображении MODIS (спутник Terra) в 07:40 GMT 13 ноября появилась чётко выраженная облачная спираль под юго-восточным берегом острова (рис. 3а, см. с. 253). Скорость приводного ветра в ПМЦ по данным скаттерометра ASCAT (спутники MetOp-A/B) около 07:00 GMT (рис. 3б) составляла 15–17 м/с. В этом же районе ПМЦ попал под влияние холодной высотной депрессии, которая перемещалась с севера на юг и 12–13 ноября пересекала о. Врангеля (карты AT500 NCDC за 00:00 и 12:00 GMT 13 ноября не представлены). Орография восточной части острова, бароклинная неустойчивость в пограничном слое атмосферы и холодная высотная депрессия в комплексе дали импульс его быстрому развитию.

Полярный мезоциклон развивался и смещался на юг. Он достиг стадии максимального развития примерно в 00:00 GMT 14 ноября. Инфракрасные изображения, VIIRS и MODIS демонстрируют облачную спираль ПМЦ. Центральная часть спирали сначала состояла из двух мезовихрей (рис. 4а), а уже через час мезовихри объединились в один (рис. 4б). Зона максимальных ветров (≥ 20 м/с) расположена на южной периферии ПМЦ, где велики градиенты давления между барической ложбиной, в которой он развивался, и ленско-колымским отрогом сибирского антициклона (рис. 4в). Следует отметить хорошую корреляцию полей приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT (рис. 4в) и радиометра AMSR2 (рис. 5а). По данным AMSR2, в южном секторе ПМЦ скорость ветра $W \geq 20$ м/с (рис. 4в). В результате перестройки барического поля ПМЦ сделал петлю в районе о. Врангеля и начал перемещаться в направлении покрытого молодым льдом Восточно-Сибирского моря, над которым постепенно заполнился.

Спиральная структура ПМЦ в стадии максимального развития отчётливо проявляется в полях ветра (рис. 5а, см. с. 255), водяного пара (рис. 5б) и капельной влаги (рис. 5в) по данным AMSR2. Очень хорошо видна сухая малооблачная и маловетренная центральная часть (глаз) ПМЦ (см. рис. 5а–в).

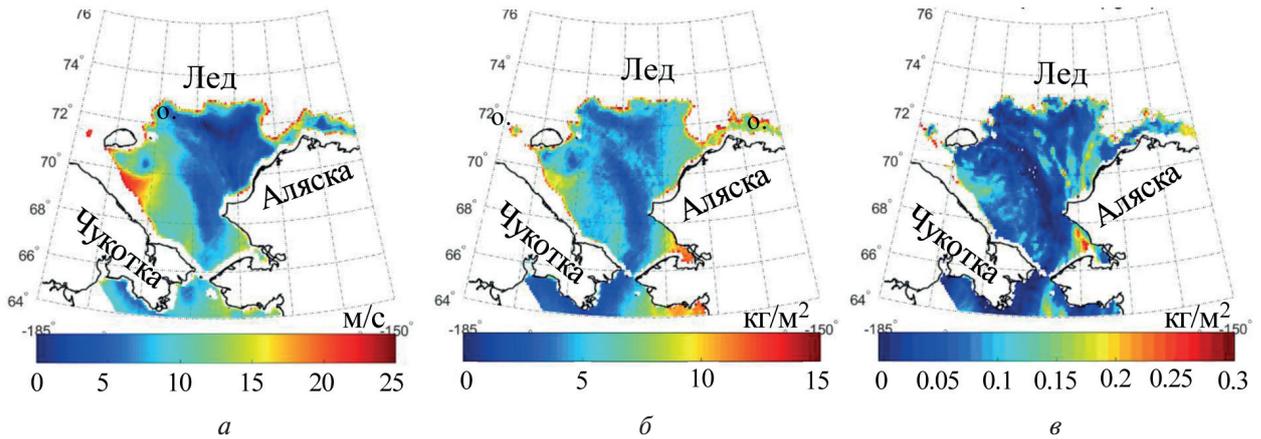


Рис. 5. Поля скорости приводного ветра (а), интегрального паросодержания атмосферы (б) и водозапаса облаков (в) по измерениям радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 22:54 GMT 13 ноября 2016 г. Области повышенных значений параметров вдоль кромки льда появляются в результате некорректной фильтрации морского льда

Паросодержание атмосферы в ПМЦ составляет $V \approx 5 \text{ кг/м}^2$; в юго-западном секторе, в зоне максимальных ветров, V возрастает до $7\text{--}8 \text{ кг/м}^2$ (см. рис. 5б). Водозапас облаков $Q \geq 0,1 \text{ кг/м}^2$ также сконцентрирован в его юго-западном секторе (см. рис. 5в). Сухая безоблачная полоса между двумя облачными спиралями ПМЦ (см. рис. 4а, б), которая проявляется в полях приводного ветра, водяного пара и капельной влаги (см. рис. 5а–в), сформировалась в результате нисходящих токов воздуха на оси узкой перемычки высокого давления между ПМЦ и малоградиентной депрессией, расположенной к северо-востоку от него (карты приземного анализа, не представлены).

Рассмотренный мезомасштабный процесс является характерным для Чукотского моря. На эволюцию ПМЦ влияли три основных фактора, способствующих мезомасштабному циклогенезу. ПМЦ возник вблизи ледовой кромки в результате сильного циклонического сдвига ветра на оси барической ложбины. Его развитию способствовала бароклинная неустойчивость в пограничном слое атмосферы, обусловленная температурными контрастами подстилающей поверхности (ледяным покровом с севера и свободной ото льда морской поверхностью с юга). Импульс к быстрому развитию ПМЦ получил в результате орографического эффекта при пересечении им восточной части о. Врангеля, где расположен горный массив высотой $500\text{--}1000 \text{ м}$. Большую роль в усилении его интенсивности и формировании мощной конвективной облачности играла холодная высотная депрессия, под влияние которой он попал во время перемещения вблизи о. Врангеля. Выполнялись условия для развития проникающей конвекции (разность между температурой скин-слоя и воздуха на высоте изобарической поверхности 500 гПа $\Delta T = T_{\text{в}} - T_{500} \geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$). Сочетание перечисленных факторов способствовало появлению и развитию интенсивного ПМЦ со скоростью ветра $\geq 20 \text{ м/с}$.

Тип II. Реверсивно-сдвиговые мезоциклоны в зоне конвергенции воздушных потоков пограничного слоя атмосферы

Адвекция холода из приполюсных районов и адвекция тепла из системы берингоморских циклонов способствует конвергенции воздушных потоков в пограничном слое атмосферы над Чукотским морем. При определённом положении барических образований воздушные потоки в зонах конвергенции могут иметь практически противоположное (встречное) направление, что способствует формированию бароклиновых волн и реверсивно-сдвиговых ПМЦ (Kolstad, 2006; Rasmussen, Turner, 2003; Sergeev et al., 2017). В качестве примера рассмотрим цепочку из двух мезовихрей 8–9 ноября 2016 г. (рис. 6, см. с 256). ПМЦ развивались на бароклиновых волнах в устойчивом воздушном потоке северных румбов на северо-восточной периферии ленско-колымского отрога сибирского антициклона.

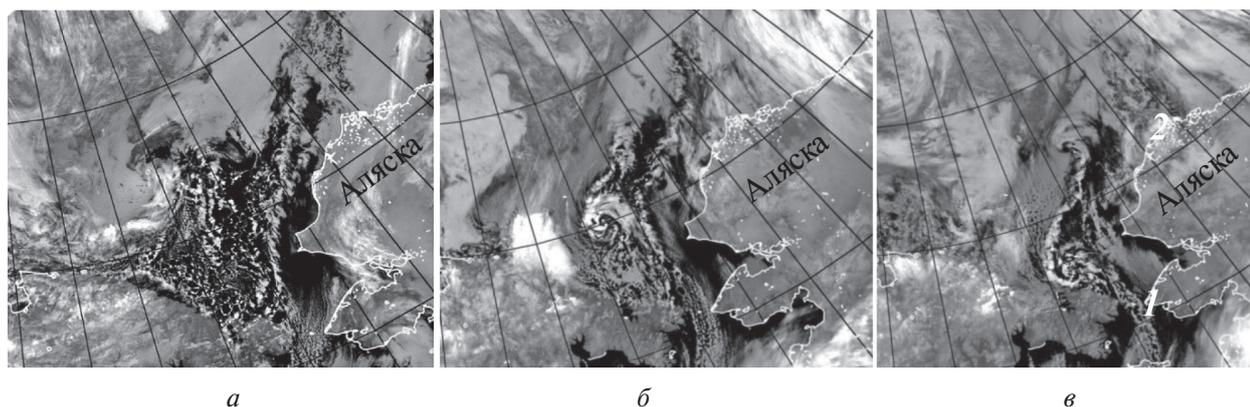


Рис. 6. Эволюция реверсивно-сдвиговых мезоциклонов в полях облачности по данным MODIS в 23:35 GMT 7 ноября (а), 14:35 GMT 8 ноября (б) и 00:00 GMT 9 ноября (в) 2016 г.

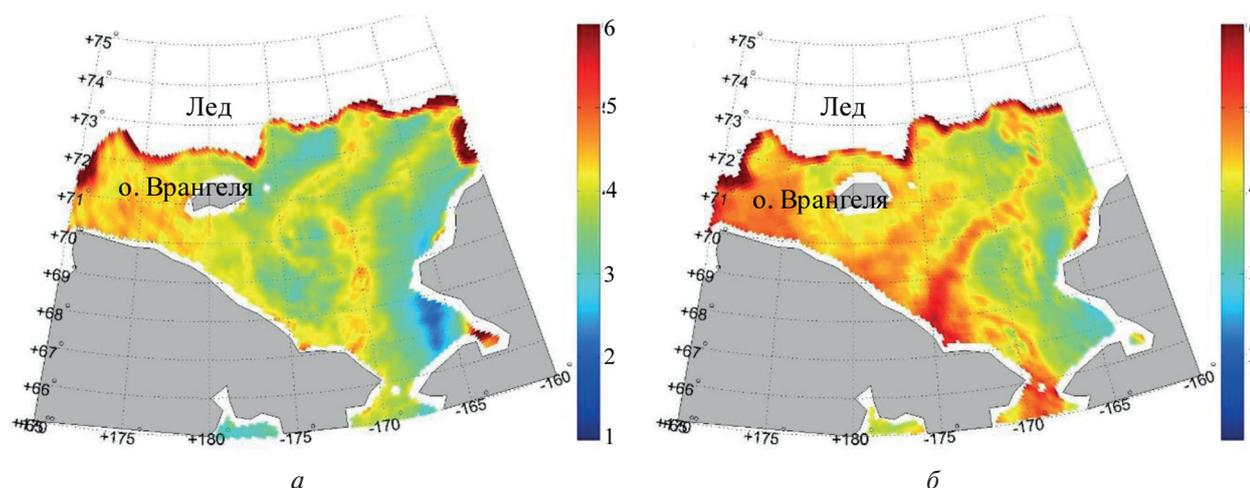


Рис. 7. Поля интегрального паросодержания атмосферы по измерениям радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 14:31 GMT 8 ноября (а) и 00:15 GMT 9 ноября (б) 2016 г. Шкалы в кг/м²

По северной периферии обширного берингоморского циклона на Чукотское море выносилась относительно тёплая морская воздушная масса. Разность температуры вода – $AT500 \Delta T = T_{\text{вода}} - T_{500} \geq 40^\circ\text{C}$ указывала на благоприятные условия для развития глубокой конвекции.

Структура термобарического поля нижней тропосферы способствовала формированию над морем вблизи северо-западного побережья Аляски ядра высокого давления (карты приземного анализа и барической топографии за 8–9 ноября 2016 г. NCDC, не представлены) и юго-восточного воздушного потока над восточной частью моря. Над северной частью моря воздушные потоки имели северо-восточное направление. На это указывают облачные гряды серого тона на ИК-изображениях MODIS (см. рис. 6а–в), которые являются индикатором адвекции холода. В поле облачности (см. рис. 6а) виден формирующийся вихрь мезо-β-масштаба у ледовой кромки (Orlanski, 1975). ПМЦ быстро развивался и перемещался на юго-запад вниз по потоку. Чётко выраженная спиральная форма облачной системы с безоблачным глазом в центре показывает, что ПМЦ достиг стадии максимального развития в 14:35 GMT 8 ноября (см. рис. 6б). Скорость ветра в его западном секторе составляла примерно 15–17 м/с. В поле облачности прослеживается начальная стадия развития ещё одной бароклинной волны в пограничном слое атмосферы у ледовой кромки, на месте формирования первого ПМЦ. Вторая волна также развилась в мезоциклон (см. рис. 6в). Подобные цепочки из двух ПМЦ наблюдаются над Охотским и Японским морями.

Эволюция ПМЦ прослеживается в полях водяного пара по данным измерений AMSR2. Рисунок 7а демонстрирует ПМЦ в стадии максимального развития. Паросодержание атмосферы

в его облачной системе составляет около 5 кг/м^2 с максимальными значениями в западном секторе, где скорость ветра по данным AMSR2 $\geq 15 \text{ м/с}$. В границах облачной полосы, которая тянется от кромки льда к центру ПМЦ (см. рис. 6в), локализуется полоса водяного пара с $V \approx 5 \text{ кг/м}^2$ (рис. 7б). На её северной оконечности образовалась вторая бароклинная волна, на которой сформировался ещё один мезовихрь. В поле водяного пара (см. рис. 7б) отчётливо видна вихревая структура развивающегося северного ПМЦ, в то время как южный уже достиг побережья и начал заполняться. В результате перестройки барического поля северный ПМЦ потерял связь с южным и перемещался на восток.

Тип III. Подветренные мезоциклоны

Под влиянием орографии над прибрежными акваториями Чукотского моря, чаще всего над бухтами, при определённых направлениях натекающего потока возникают локальные мезоциклонические возмущения, которые называют подветренными мезоциклонами (Зимич, 1998; Kristjansson et al., 2011; Martin, Moore, 2006; Tsuboki, Asai, 2004). Подветренные ПМЦ могут вызывать резкие вспышки скорости ветра, а также местные экстремумы сдвига ветра, что угрожает безопасности мореплавания и создаёт опасные для авиации зоны турбулентности (Зимич, 1998). Одним из характерных районов возникновения подветренных мезоциклонов является зал. Коцебу. ПМЦ возникают с подветренной стороны п-ова Лисберн при северо-восточном направлении натекающего потока. Рисунок 8а демонстрирует формирование локального завихрения под влиянием орографического эффекта мысов Лисберн и Хоп. Серый тон облачности ПМЦ указывает на её незначительное вертикальное развитие. Разность температур вода – АТ500 $\Delta T = T_w - T_{500} \approx 32 \text{ }^\circ\text{C}$ свидетельствует об устойчивой стратификации нижней тропосферы и неблагоприятных условиях для развития мощной конвекции. Таким образом, правомерно предположить, что воздушная масса перемещалась почти горизонтально над морем и образование малоинтенсивного мезоциклона с подветренной стороны гор было обусловлено чисто механическим воздействием орографии (Kristjansson et al., 2011; Tsuboki, Asai, 2004).

Несмотря на незначительное вертикальное развитие конвективного слоя, паросодержание атмосферы в облачности ПМЦ достаточно велико для ВЕА и составляет $7\text{--}8 \text{ кг/м}^2$ (рис. 9а, г, см. с. 258). Возможно, это обусловлено более высокой температурой морской поверхности в южной части Чукотского моря. На отдельных участках облачной системы, где водозапас облаков достигает $0,3 \text{ кг/м}^2$, вероятны осадки (рис. 9б, д).

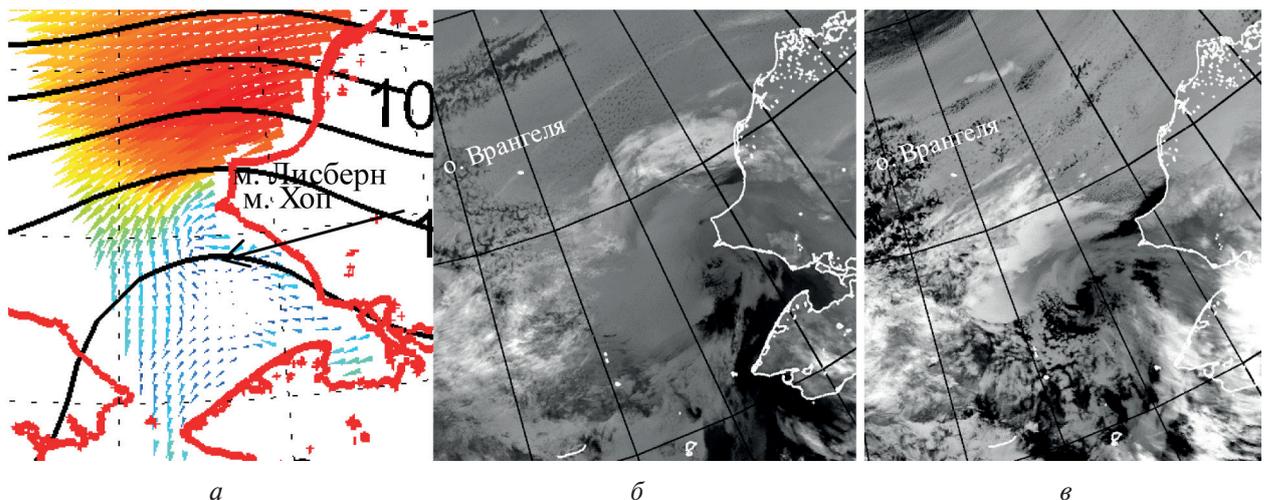


Рис. 8. Фрагмент поля вектора ветра по данным ASCAT в 08:00 GMT 4 ноября (а), ИК-изображения MODIS (спутник Aqua) в 15:00 GMT 4 ноября (б) и в 00:25 GMT (спутник Terra) 5 ноября (в) 2016 г. Стрелка на рисунке (а) указывает на ПМЦ в начальной стадии развития

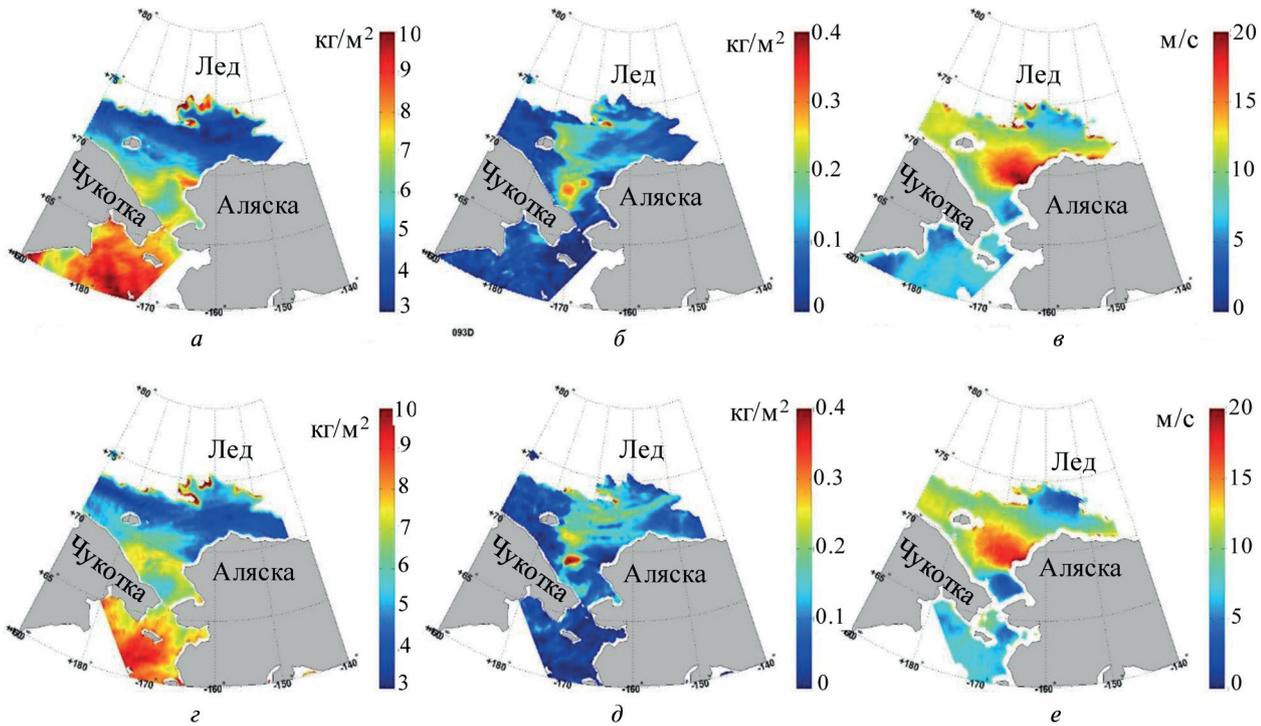


Рис. 9. Поля интегрального паросодержания атмосферы (а, г), водозаписа облаков (б, д) и приводного ветра (в, е) по измерениям радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 14:56 GMT (верхний ряд) и в 23:03 GMT (нижний ряд) 4 ноября 2016 г.

Максимальная скорость ветра регистрируется в северном секторе ПМЦ и составляет 15–20 м/с (рис. 9в, е). Однако необходимо отметить, что усиление ветра в северном секторе, вероятнее всего, связано не с мезоциклонической циркуляцией, а с зоной больших барических градиентов между гребнем арктического антициклона и алеутской депрессией (карты приземного анализа NCDC, не представлены). ПМЦ перемещался на юго-запад и заполнился у арктического побережья Чукотки.

Тип IV. Вторичные вихри — облачные запятые за холодным фронтом

Вторичные вихри за холодным фронтом в тылу циклонов синоптического масштаба, так называемые облачные запятые, в восточном секторе Арктики встречаются реже и имеют меньшие размеры, чем в её атлантическом секторе и умеренных широтах. Облачная запятая, которая существовала 21–22 октября 2016 г., возникла в результате адвекции холода в тылу окклюдированного арктического циклона, когда вторичный холодный фронт пересёк кромку льда и обострил зону бароклинной неустойчивости на границе между ледяным покровом и открытой морской поверхностью (рис. 10а, см. с. 259). В поле облачности (рис. 10б) видна голова запятая 1 мезо-β-масштаба (<100 км в диаметре) с отчётливо выраженным безоблачным глазом. «Хвост» запятая 2 идентифицируется как вторичный холодный фронт.

Из-за очень маленького размера мезоциклонической циркуляции практически не проявляется в поле вектора ветра по данным скаттерометра, однако отчётливо выделяется в грациях скорости ветра значениями 15–17 м/с на фоне холодного вторжения, которое характеризуется скоростями ветра 14–16 м/с (рис. 11а, см. с. 259). В поле ветра по данным AMSR2 видна резкая внешняя граница запятая (рис. 11б). Несмотря на специфический размер и небольшое количество водяного пара, облачная запятая отчётливо выделяется в поле паросодержания атмосферы по данным AMSR2 значениями $V \approx 5 \text{ кг/м}^2$ на фоне $V = 3\text{--}4 \text{ кг/м}^2$ (рис. 11в). В поле водяного пара хорошо видна структура запятая с глазом, в котором паросодержание атмосферы близко к фоновым значениям.

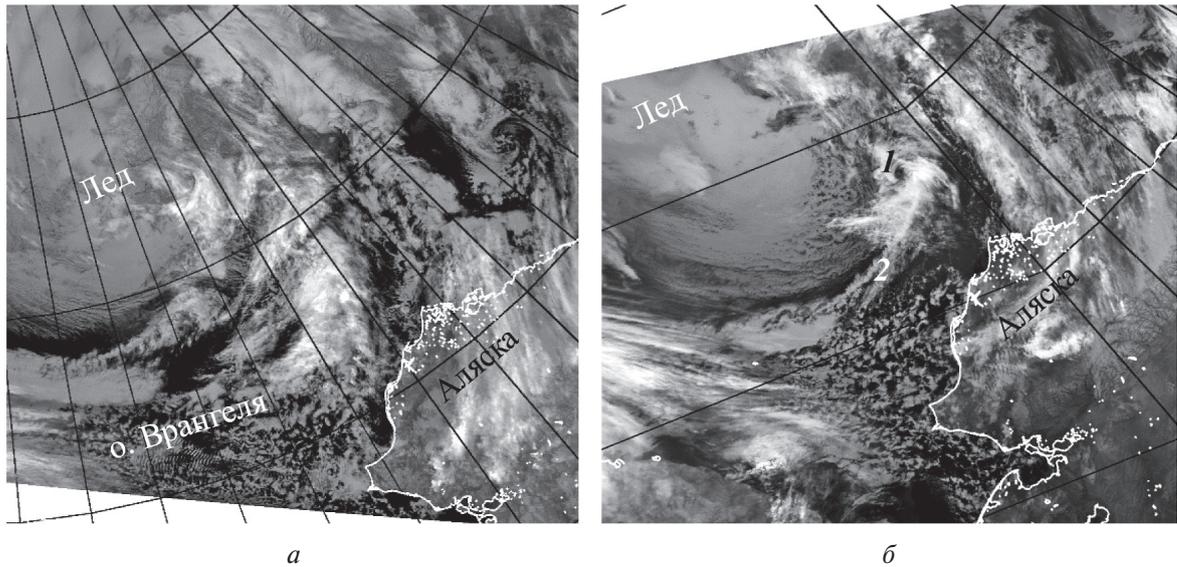


Рис. 10. Формирование облачной запятой по данным спектро радиометра MODIS на спутнике Terra в 14:45 GMT (а) и 23:35 GMT (б) 21 октября 2016 г. Структуры 1 и 2 на рисунке (б) поясняются в тексте

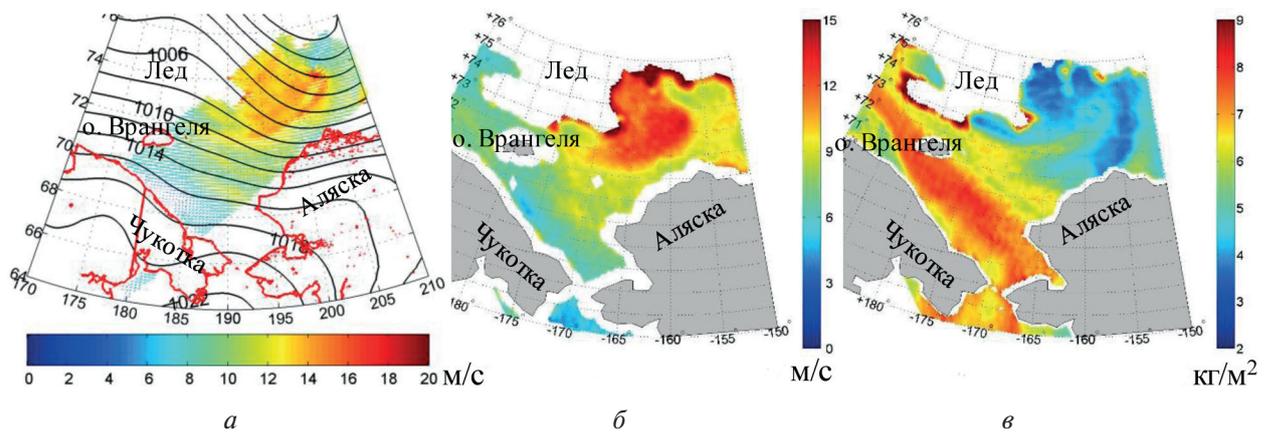


Рис. 11. Поля приводного ветра по измерениям скаттерометра ASCAT в 00:00 GMT 22 октября (а) и радиометра AMSR2 в 22:48 GMT 21 октября (б); поле интегрального паросодержания атмосферы по измерениям AMSR2 в 22:48 GMT 21 октября (в) 2016 г.

Несмотря на незначительные размеры, облачные запятые опасны для мореплавания резкими всплесками скорости ветра и изменением его направления, которые трудно прогнозировать из-за быстрого развития процесса.

Заключение

На данном этапе исследований, направленных на районирование и типизацию условий и механизмов мезоциклонической деятельности в Евразийской Арктике, была обнаружена такая региональная особенность Чукотского моря, как отсутствие доминирующих направлений перемещения полярных мезоциклонов, что объясняется сложностью синоптических процессов в ВЕА. Были выявлены четыре типа механизмов мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем и прилегающей к нему с севера акваторией СЛО:

Тип I — ПМЦ возникают в области сильного циклонического сдвига ветра на оси барической ложбины, которая формируется на северной периферии берингоморских циклонов. Ложбины обычно вытягиваются вдоль кромки ледяных полей. С ними связаны мелкие ба-

роклинные зоны — фронты пограничного слоя атмосферы. Импульс к быстрому развитию ПМЦ получают в результате орографического эффекта, если пересекают гористую восточную часть о. Врангеля. Формированию мощной конвективной облачности и интенсификации ПМЦ способствует холодная высотная депрессия, если они попадают под её влияние.

Тип II — реверсивно-сдвиговые ПМЦ в зонах конвергенции воздушных потоков пограничного слоя атмосферы. Возникают под влиянием адвекции холода от приполюсных ледяных полей и адвекции тепла из системы берингоморских циклонов при благоприятной структуре термобарического поля нижней тропосферы. Определённое положение барических образований способствует конвергенции воздушных потоков. В зонах конвергенции формируются бароклинные волны, на которых развиваются вихревые цепочки. Отдельные элементы цепочек укрупняются и развиваются в мезоциклоны.

Тип III — подветренные ПМЦ. Они возникают вблизи южного побережья п-ва Лисберн, Аляска. Их формированию способствуют локальные завихрения под влиянием орографии мысов Лисберн и Хоп при северо-восточном направлении натекающего потока. Такие ПМЦ могут развиваться при достаточно устойчивой стратификации атмосферы, когда условия для развития атмосферной конвекции неблагоприятны ($\Delta T \leq 38$ °C). Их формирование обусловлено чисто механическим воздействием орографии (Tsuboki, Asai, 2004).

Тип IV — облачные запятые за холодным фронтом (вторичные вихри), которые возникают, когда порции холодного воздуха в тылу окклюдированных арктических циклонов пересекают кромку льда и попадают в зону бароклинной неустойчивости на границе между ледяным покровом и открытой морской поверхностью. При этом «хвост» запятой идентифицируется как вторичный холодный фронт.

Перечисленные комбинации элементов атмосферной циркуляции, запускающие механизмы образования ПМЦ, можно интерпретировать как предварительные прогностические признаки мезомасштабного циклогенеза над Чукотским морем. Для их уточнения и верификации необходим анализ более длительных рядов наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 15-I-1-009_о.

Литература

1. Гурвич И. А., Пичугин М. К. Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 51–59.
2. Гурвич И. А., Заболотских Е. В. Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 101–112.
3. Гурвич И. А., Митник Л. М., Митник М. Л. Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе спутниковых микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 58–73.
4. Гурвич И. А., Заболотских Е. В., Пичугин М. К. Особенности мезомасштабного циклогенеза над восточным сектором Евразийской Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 227–237.
5. Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 64–77.
6. Зимич П. И. Атмосферные процессы и погода Восточной Арктики. Владивосток: Дальнаука, 1998. 236 с.
7. Blechschmidt A. M. A 2-year climatology of polar low events over the Nordic Seas from satellite remote sensing // Geophysical Research Lett. 2008. V. 35. No. 9. L09815. DOI: 10.1029/2008GL033706.
8. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Arctic polar low detection and monitoring using atmospheric water vapor retrievals from satellite passive microwave data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 9. P. 3302–3310.

9. *Chen F., von Storch H.* Trends and Variability of North Pacific Polar Lows // *Advances in Meteorology*. 2013. V. 2013, Article ID 170387. 11 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/170387>.
10. *Condron A., Renfrew I.A.* The impact of polar mesoscale storms on northeast Atlantic Ocean circulation // *Nature Geoscience*. 2012. V. 6. No. 1. P. 34–37.
11. *Fu G.* Polar lows: Intense cyclones in winter. China Meteorological Press, 2000. 206 p.
12. *Gurvich I.A., Zabolotskikh E.V., Pichugin M.K.* Mesoscale cyclones and cold air outbreaks over the eastern part of the Eurasian Arctic using the satellite multisensor measurements and reanalysis // 13th European Polar Lows Working Group (EPLWG) Workshop. 25–26 April 2016, Paris, France. URL: <https://www.uni-trier.de/index.php?id=57240>.
13. *Kolstad E.W.* A new climatology of favourable conditions for reverse-shear polar lows // *Tellus*. 2006. V. 58A. P. 344–354.
14. *Kristjansson J.E., Thorsteinsson S., Kolstad E.W., Blechschmidt A.-M.* Orographic influence of east Greenland on a polar low over the Denmark Strait // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137A. P. 1773–1789.
15. *Martin R., Moore G.W.K.* Transition of a synoptic system to a polar low via interaction with the orography of Greenland // *Tellus*. 2006. V. 58A. P. 236–253.
16. *Mitnik L.M., Gurvich I.A.* Satellite sensing of intense winter mesocyclones forming to the east of Korea // *Current Development in Oceanography*. 2011. V. 2. No. 2. P. 115–123.
17. *Ninomiya K.* Polar/comma-cloud lows over the Japan Sea and the northwestern Pacific in winter // *J. Meteorological Society of Japan*. 1989. V. 67. P. 83–97.
18. *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.
19. *Ninomiya K., Nishimura T., Susuki T., Matsumura S., Ohfuchi W.* Polar low genesis over the east coast of the Asian continent simulated in an AGCM // *J. Meteorological Society of Japan*. 2003. V. 81. No. 4. P. 697–712.
20. *Orlanski I.* A rational subdivision of scales for atmospheric processes // *Bull. American Meteorological Society*. 1975. V. 56. P. 527–530.
21. *Rasmussen E.A., Turner J.* Polar lows: mesoscale weather systems in the Polar Regions. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2003. 612 p.
22. *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: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. V. 67. 24660. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.
23. *Sergeev D.E., Renfrew I.A., Spengler T., Dorling S.R.* Structure of a shear-line polar low // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2017. V. 143. P. 12–26.
24. *Shimada U., Wada A., Yamazaki K., Kitabatake N.* Roles of an upper-level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014. V. 66(1). 24694. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.24694>.
25. *Terpstra A., Spengler T., Moore R.W.* Idealised simulations of polar low development in an Arctic moist-baroclinic environment // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2015. V. 141. Iss. 691. P. 1987–1996.
26. *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.
27. *Watanabe Shun-ichi 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. 2503–515.
28. *Yanase W., Niino H., Watanabe Shun-ichi 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. V. 29. No. 2. P. 419–437.
29. *Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B.* New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // *Geophysical Research Lett.* 2013. V. 40. No. 13. P. 3347–3350.
30. *Zabolotskikh E.V., Gurvich I.A., Chapron B.* (2016a) Polar lows over the eastern part of the Eurasian Arctic: The sea-ice retreat consequence // *Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2016. V. 13. No. 10. P. 1492–1496.
31. *Zabolotskikh E., Gurvich I., Myasoedov A., Chapron B.* (2016b) Detection and study of the polar lows over the arctic sea ice edge // *Proc. 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*. 10–15 July 2016, Beijing, China. 2016. P. 7705–7707.
32. *Zabolotskikh E.V., Gurvich I.A., Chapron B.* Detectability of the arctic polar lows over the Barents Sea ice edge using multi-sensor approach // *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. — Fall (PIERS — FALL)*. 2017. P. 2380–2384.

Conditions and mechanisms of mesoscale cyclogenesis over the Chukchi Sea

I. A. Gurvich¹, E. V. Zabolotskikh², M. K. Pichugin¹

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru

² Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 195196, Russia
E-mail: liza@rshu.ru

An investigation was conducted to identify the areas of mesocyclonic activity over the Chukchi Sea. The conditions and mechanisms of mesoscale cyclogenesis were revealed and classified. The study was based on the synergistic use of multi-sensor satellite measurement data and the CFSv2 model from the operational analysis of the Climate Forecast System, Version 2 of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), supplemented by synoptic surface analysis and baric topography maps. Satellite visible and infrared (IR) images of the MODIS spectroradiometer from the Aqua and Terra satellites and the VIIRS radiometer from the Suomi NPP satellite were used to identify polar mesocyclone (PMC) cloud system. The fields of the atmospheric water vapor content, cloud liquid water content, and sea surface wind speed were retrieved from the measurements of the AMSR2 passive microwave radiometer onboard GCOM-W1 satellite, using the algorithms based on brightness temperature physical modeling with the subsequent geophysical parameter retrievals using neural networks. A complex analysis of the CFSv2 and ASCAT (MetOp-A/B) sea surface wind vector fields in period of September-December 2016 was performed. Four typical mechanisms of mesoscale cyclogenesis over the Chukchi Sea and north adjacent Arctic Ocean were identified: I — PMCs in the cyclonic wind shear along the baric trough axis; II — reverse-shear PMCs in the convergence zone of air flows; III — leeward PMCs under the influence of the orography of the Lisburn Peninsula in the northeast direction of the onflowing stream; IV — comma cloud behind the cold front in the rear of synoptic scale cyclones (secondary vortices). It is found out that the orographic effect shows itself when a PMC crosses the eastern extremity of the Wrangel Island. The main condition for the appearance and development of PMCs is the presence of cold upper-level lows and shallow baroclinic zones in the atmospheric boundary layer, which are formed as a result of large temperature contrasts along the sea ice edges. Despite the low atmospheric water vapor content in the PMC cloud system (4–8 kg/m²), they are clearly distinguished in water vapor fields, which can be used to identify them along with sea surface wind fields and satellite images of clouds.

Keywords: polar mesocyclones, Chukchi Sea, satellites, multisensory measurements, atmosphere water vapor content, cloud liquid water, sea surface wind, ice cover

Accepted: 07.06.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-249-264

References

1. Gurvich I. A., Pichugin M. K., Issledovanie kharakteristik intensivnykh mezomasshtabnykh tsiklonov nad dal'nevostochnymi moryami na osnove sputnikovogo mul'tisensornogo zondirovaniya (Research of characteristics of intensive mesoscale cyclones over the Far Eastern Seas on the basis of satellite multisensor sounding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 51–59.
2. Gurvich I. A., Zabolotskikh E. V., Mezomasshtabnye polyarnye tsiklony nad vostochnym sektorom Arktiki po dannym mul'tisensornogo sputnikovogo zondirovaniya (Mesoscale polar lows over the Eastern Arctic Sector according to multisensor satellite remote sensing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 101–112.
3. Gurvich I. A., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Mezomasshtabnyi tsiklogenez nad dal'nevostochnymi moryami: issledovanie na osnove sputnikovyykh mikrovolnovyykh radiometricheskikh i radiolokatsionnykh izmerenii (Mesoscale Cyclogenesis over the Far Eastern Seas: Study Based on Satellite Microwave Radiometric and Radar Measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 58–73.
4. Gurvich I. A., Zabolotskikh E. V., Pichugin M. K., Osobennosti mezomasshtabnogo tsiklogeneza nad vostochnym sektorom Evraziiskoi Arktiki (Features of mesoscale cyclogenesis over the eastern sector of the

- Eurasian Arctic), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 227–237.
5. Zabolotskikh E. V., Gurvich I. A., Chapron B., New areas of polar lows over the Arctic as a result of the decrease in sea ice extent, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 9, pp. 1021–1033.
 6. Zimich P. I., *Atmosfernye protsessy i pogoda Vostochnoi Arktiki* (Atmospheric processes and weather Eastern Arctic), Vladivostok: Dal'nauka, 1998, 236 p.
 7. Blechschmidt A. M., A 2-year climatology of polar low events over the Nordic Seas from satellite remote sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, No. 9, L09815, DOI: 10.1029/2008GL033706.
 8. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Arctic polar low detection and monitoring using atmospheric water vapor retrievals from satellite passive microwave data, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2011, Vol. 49, No. 9, pp. 3302–3310.
 9. Chen F., von Storch H., Trends and Variability of North Pacific Polar Lows, *Advances in Meteorology*, 2013, Vol. 2013, Article ID 170387, 11 p., URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/170387>.
 10. Condron A., Renfrew I. A., The impact of polar mesoscale storms on northeast Atlantic Ocean circulation, *Nat. Geosci.*, 2012, Vol. 6, No. 1, pp. 34–37.
 11. Fu G., *Polar lows: Intense cyclones in winter*, China Meteorological Press, 2000, 206 p.
 12. Gurvich I. A., Zabolotskikh E. V., Pichugin M. K., Mesoscale cyclones and cold air outbreaks over the eastern part of the Eurasian Arctic using the satellite multisensor measurements and reanalysis, *13th European Polar Lows Working Group (EPLWG) Workshop, 25–26 April 2016, Paris, France*, 2016, URL: <https://www.uni-trier.de/index.php?id=57240>.
 13. Kolstad E. W., A new climatology of favourable conditions for reverse-shear polar lows, *Tellus*, 2006, Vol. 58A, pp. 344–354.
 14. Kristjansson J. E., Thorsteinsson S., Kolstad E. W., Blechschmidt A.-M., Orographic influence of east Greenland on a polar low over the Denmark Strait, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137A, pp. 1773–1789.
 15. Martin R., Moore G. W. K., Transition of a synoptic system to a polar low via interaction with the orography of Greenland, *Tellus*, 2006, Vol. 58A, pp. 236–253.
 16. Mitnik L. M., Gurvich I. A., Satellite sensing of intense winter mesocyclones forming to the east of Korea, *Current Development in Oceanography*, 2011, Vol. 2, No. 2, pp. 115–123.
 17. Ninomiya K., Polar/comma-cloud lows over the Japan Sea and the northwestern Pacific in winter, *J. Meteorol. Society of Japan*, 1989, Vol. 67, pp. 83–97.
 18. 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. Meteorol. Society of Japan*, 1993, Vol. 71, pp. 73–91.
 19. Ninomiya K., Nishimura T., Susuki T., Matsumura S., Ohfuchi W., Polar low genesis over the east coast of the Asian continent simulated in an AGCM, *J. Meteorol. Society of Japan*, 2003, Vol. 81, No. 4, pp. 697–712.
 20. Orlanski I., A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, Vol. 56, pp. 527–530.
 21. Rasmussen E. A., Turner J., *Polar lows: mesoscale weather systems in the polar regions*, Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2003, 612 p.
 22. 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: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2015, Vol. 67, 24660, URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.
 23. Sergeev D. E., Renfrew I. A., Spengler T., Dorling S. R., Structure of a shear-line polar low, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2017, Vol. 143, pp. 12–26.
 24. Shimada U., Wada A., Yamazaki K., Kitabatake N., Roles of an upper-level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, Vol. 66, 24694, URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.24694>.
 25. Terpstra A., Spengler T., Moore R. W., Idealised simulations of polar low development in an Arctic moist-baroclinic environment, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2015, pp. 1987–1996.
 26. Tsuboki K., Asai T., The multi-scale structure and development mechanism of mesoscale cyclones over the Sea of Japan in winter, *J. Meteorol. Society of Japan*, 2004, Vol. 82, pp. 597–621.
 27. Watanabe Shun-ichi 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.
 28. Yanase W., Niino H., Watanabe Shun-ichi 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.

29. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, Vol. 40, No. 13, pp. 3347–3350.
30. Zabolotskikh E. V., Gurvich I. A., Chapron B., Polar lows over the eastern part of the Eurasian Arctic: The sea-ice retreat consequence, *Geoscience and Remote Sensing Lett.*, 2016, Vol. 13, No. 10, pp. 1492–1496.
31. Zabolotskikh E., Gurvich I., Myasoedov A., Chapron B., Detection and study of the polar lows over the arctic sea ice edge, *Proc. IGARSS 2016, 10–15 July 2016, Beijing, China*, 2016, pp. 7705–7707.
32. Zabolotskikh E. V., Gurvich I. A., Chapron B., Detectability of the arctic polar lows over the Barents Sea ice edge using multi-sensor approach, *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. — Fall (PIERS – FALL)*, 2017, pp. 2380–2384.