

## Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования

И.А. Гурвич, М.К. Пичугин

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильчева ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43  
E-mail: gurvich@poi.dvo.ru

В холодный сезон над дальневосточными (ДВ) морями формируется от 150 до 250 мезоциклонов (МЦ) со скоростью ветра  $\geq 12$  м/с. МЦ, формирующиеся над Охотским морем, отличаются от япономорских по структуре облачной системы и атмосферным параметрам. Для исследования таких параметров МЦ, как скорость приводного ветра, интегральное содержание водяного пара и капельной влаги в атмосфере, структуры и вертикальной протяженности их облачности целесообразно использовать в комплексе данные спектрорадиометра MODIS и микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua, а также радиолокатора миллиметрового диапазона CPR (Cloud Profiling Radar) со спутника CloudSat.

**Ключевые слова:** мезомасштабные циклоны, мультисенсорное спутниковое зондирование, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, приводный ветер, структура облачности.

### Введение

В холодный период года над морями высоких широт на спутниковых изображениях время от времени видны мезомасштабные конвективные циклоны (МЦ) размером от 100 до 1000 км с облачной системой в форме запятой или спирали и с жизненным циклом от нескольких часов до 3 суток. Наиболее интенсивные из них называют полярными циклонами или полярными ураганами, а из-за взрывного характера формирования – полярными бомбами.

Дальневосточные (ДВ) моря в силу географического положения и климатического режима являются районами активного мезомасштабного циклогенеза. Структура термо-барического поля, характер элементов крупномасштабной атмосферной циркуляции над Дальним Востоком, интенсификация взаимодействия океана и атмосферы в период зимнего муссона создают благоприятные условия для зарождения МЦ, разнообразных по размерам, интенсивности и механизмам формирования.

Мезомасштабный циклогенез над ДВ морями имеет и свои характерные особенности. Типы МЦ и районы их формирования в значительной степени зависят от температурного режима морей и орографии побережья. Большой вклад в их развитие вносят турбулентные потоки тепла из океана в атмосферу. Наличие целого ряда механизмов зарождения интенсивных МЦ приводит к многообразию их типов (Rasmussen, Turner, 2003). Основные типы МЦ, формирующихся при различных синоптических ситуациях над Северной Атлантикой, наблюдаются и над ДВ морями, где по предварительным данным в холодный период (октябрь–апрель) формируется от 150 до 250 МЦ со скоростью ветра  $\geq 12$  м/с размерами преимущественно 100–600 км. Над определенными районами морей часто формируются

пары или семейства МЦ. Пик мезомасштабного циклогенеза приходится на зимние месяцы. Количество МЦ значительно зависит от суммарной продолжительности холодных вторжений с континента.

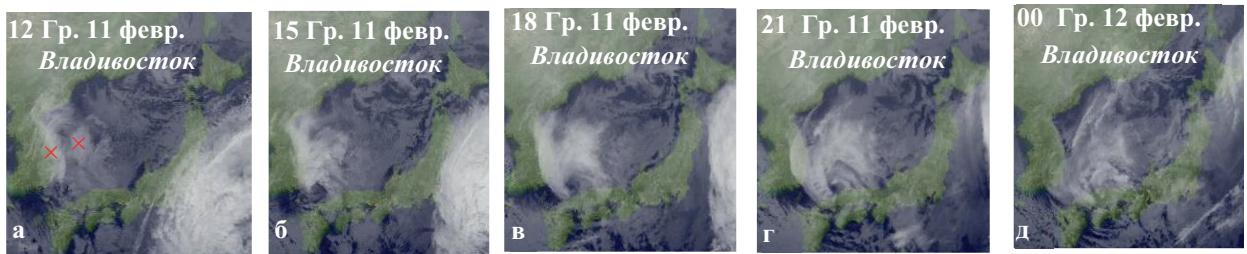
Целью работы является исследование структуры и параметров МЦ над Японским и Охотским морями на основе анализа данных спутникового мультисенсорного зондирования.

## Данные и методика

Для определения местоположения и размеров МЦ, форм облачности и высоты ее верхней границы использовались видимые и ИК-изображения и данные о температуре на верхней границе облаков, полученные спектрорадиометром *MODIS* со спутников *Terra* и *Aqua*, а также ИК-изображения с японского геостационарного спутника *MTSAT-2*. Вертикальная структура облачности МЦ исследовалась по измерениям радиолокатора миллиметрового диапазона *CPR* (Cloud Profiling Radar) со спутника *CloudSat*. Поля приводного ветра  $W$ , являющиеся индикатором интенсивности МЦ, анализировались по данным скаттерометра *ASCAT* (спутник *MetOp*) и усовершенствованного микроволнового радиометра *AMSR-E* (Митник, Митник, 2011). Паросодержание атмосферы  $V$  и водозапас облаков  $Q$  в области МЦ восстанавливались по яркостным температурам  $T_y$ , измеренным *AMSR-E* (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003). Среднесуточные турбулентные потоки явного и скрытого тепла получены из массива OAFlux (the Objectively Analyzed air-sea heat Fluxes), который находится в свободном доступе на сайте океанографического института в Вудс-Холе <http://oaflux.whoi.edu/index.html>. В качестве вспомогательных материалов использовались синоптические карты приземного анализа и барической топографии Японского метеорологического агентства (ЯМА).

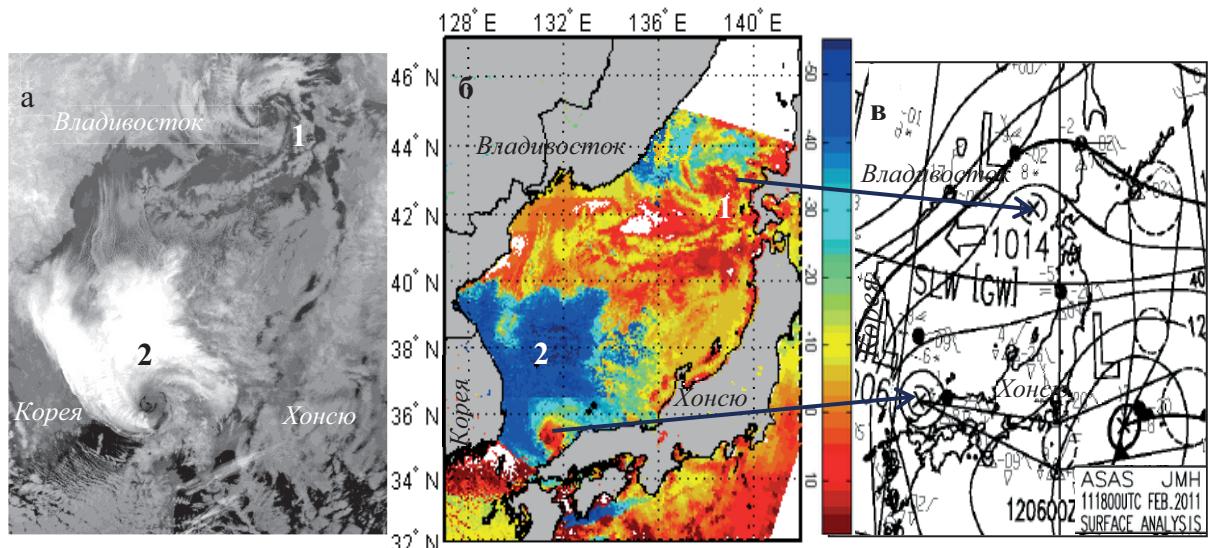
## Мезоциклоны над Японским морем 11 февраля 2011 г.

Для Японского моря характерна синоптическая ситуация, при которой мезомасштабная циклоническая деятельность охватывает одновременно северную и южную его части. Последовательность из 15 ИК-изображений, полученных с геостационарного спутника *MTSAT-2* с часовым интервалом (на *рис. 1* представлено 5 изображений в основные синоптические сроки), демонстрирует эволюцию поля облачности в заполняющемся МЦ над северной частью моря к западу от Хоккайдо и в МЦ над его южной частью, в Корейском проливе. Спутниковые данные отображают почти полный жизненный цикл южного МЦ от зарождения до начала заполнения. Красными крестиками (*рис. 1a*) обозначены зона конвергенции вдоль япономорского побережья Кореи, в южной части которой зарождается МЦ, и пятно высоко-слоистой облачности, формирующейся в результате адвекции тепла над холодным воздухом и в процессе развития МЦ, втягивающегося в его циркуляцию. МЦ существовал менее суток и начал заполняться, достигнув побережья Японии.



*Рис. 1. Эволюция мезоциклона над южной частью Японского моря.  
ИК-изображения с геостационарного спутника MTSAT-2*

На ИК-изображении спектрорадиометра **MODIS** (спутник *Aqua*) за 17:20 Гр. видны два МЦ над Японским морем (*рис. 2а*). Менее интенсивный северный МЦ 1, размером ~250 км находится в стадии заполнения. МЦ 2 над южной частью моря размером около 500 км более интенсивный и находится в стадии развития. Хорошо виден его малооблачный глаз размером ~ 50 км. МЦ 2 сформировался в южной части зоны конвергенции вдоль восточного побережья Кореи. Высота верхней границы облаков по данным **MODIS** в северном МЦ 2,5–3 км, в южном – 5–6 км (*рис. 2б*). По данным ЯМА, минимальное давление в южном МЦ в 18 Гр. было на 8 мб ниже, чем в северном (*рис. 2в*).



*Рис. 2. Мезоциклон над южной частью Японского моря 11 февраля 2011 г.:  
ИК-изображение облачности (а) и температура верхней границы облаков (б)  
по данным спектрорадиометра MODIS (спутник Aqua) за 17:20 Гр.;  
фрагмент карты приземного анализа ЯМА за 18 Гр. (в).  
1 – северный МЦ, 2 – южный МЦ*

МЦ в южной части Японского моря развивался на фоне возрастающих потоков тепла из океана в атмосферу, что способствовало его углублению (Gang, 2000; Claud et al., 2004). За сутки поток явного тепла увеличился примерно на 70–90 Вт/м<sup>2</sup>, поток скрытого тепла – на 100–120 Вт/м<sup>2</sup>. Максимальные потоки отмечались в юго-западном секторе МЦ, в зоне максимальных ветров и плотной конвективной облачности, где 11 февраля отмечались потоки скрытого тепла 250–320 Вт/м<sup>2</sup> и потоки явного тепла ~ 200–240 Вт/м<sup>2</sup> при температуре морской поверхности в этом районе 12–14 °C.

Мезомасштабная циклоническая циркуляция, размеры и структура МЦ отчетливо проявляются в полях яркостной температуры на частоте 89 ГГц на горизонтальной поляризации  $T_{\vartheta}(89\Gamma)$ , приводного ветра  $W$ , паросодержания атмосферы  $V$  и водозапаса облаков  $Q$  (рис. 3). По данным скаттерометра, скорость ветра составляла 10–12 м/с в северном МЦ и 17–20 м/с в южном (рис. 3а), а по измерениям **AMSR-E** (Mitnik, Mitnik, 2011) – 12–17 м/с и 15–20 м/с соответственно. Вблизи глаза скорость ветра достигала 25 м/с (рис. 3б). С учетом разницы во времени, состояния атмосферы и погрешностей методик данные о скорости ветра согласуются и дополняют друг друга. В северном МЦ на отдельных участках облачной спирали  $Q = 0,15–0,2 \text{ кг}/\text{м}^2$  (рис. 3г),  $V = 8–10 \text{ кг}/\text{м}^2$  (рис. 3д), в южном  $Q = 0,25–0,5 \text{ кг}/\text{м}^2$ ,  $V = 10–14 \text{ кг}/\text{м}^2$ , в стене глаза 16–18  $\text{кг}/\text{м}^2$ . Внутри глаза значения  $Q$  близки к 0. Участки 1 и 2 с малым содержанием  $Q$  и  $V$  на фоне плотной облачности соответствуют областям пониженных значений  $T_{\vartheta}(89\Gamma)$  (рис. 3в).

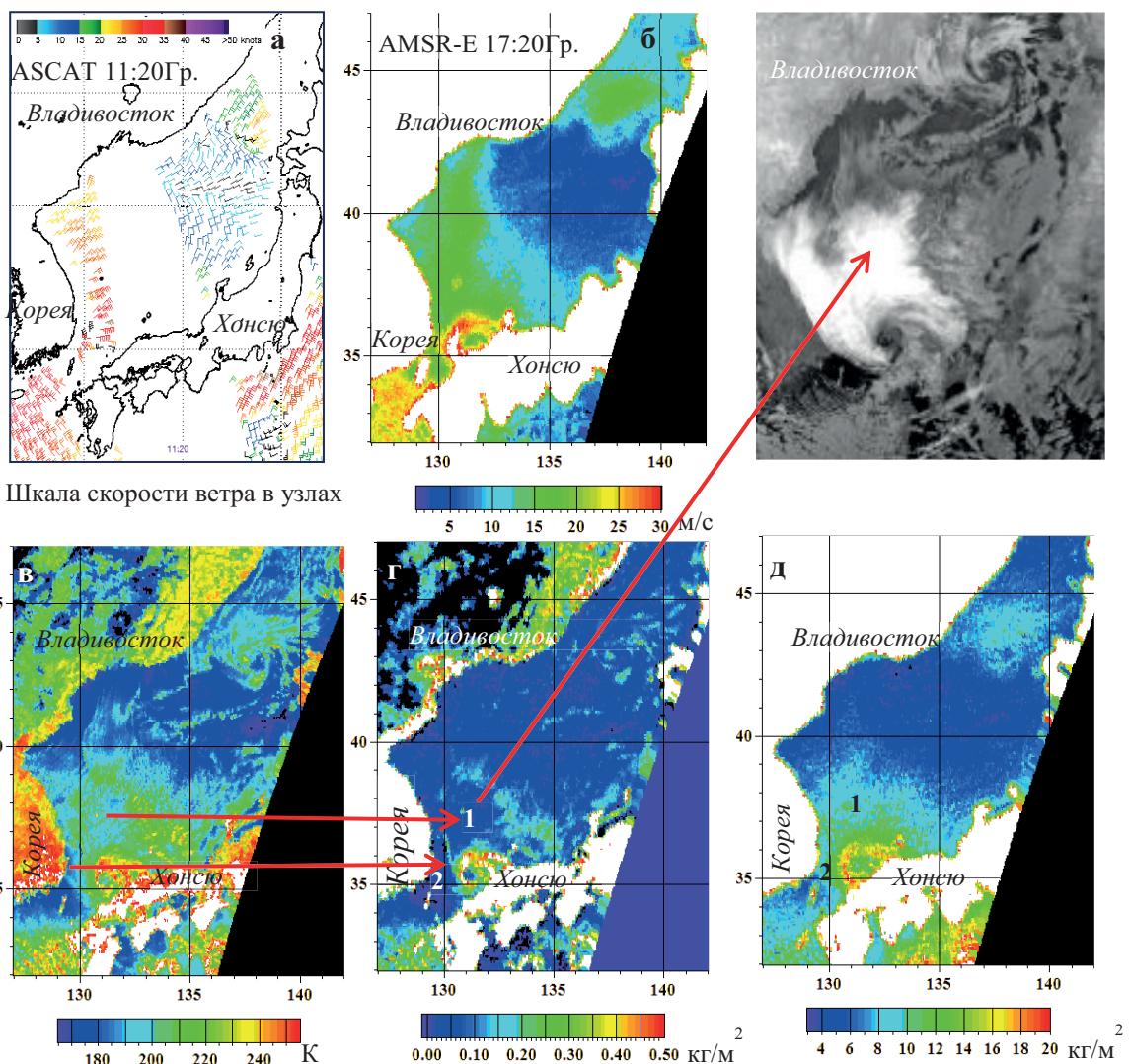


Рис. 3. Мезоциклон над южной частью Японского моря 11 февраля 2011 г.: поля приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT (спутник MetOp) за 11:20 Гр. (а) и радиометра AMSR-E (спутник Aqua) за 17:20 Гр. (б); поля: Тя(89Г) (в), водозапаса облаков (г) и паросодержания атмосферы (д) по данным радиометра AMSR-E за 17:20 Гр. Цифрами 1 и 2 обозначены участки с малым содержанием  $Q$  и  $V$  на фоне плотной облачности

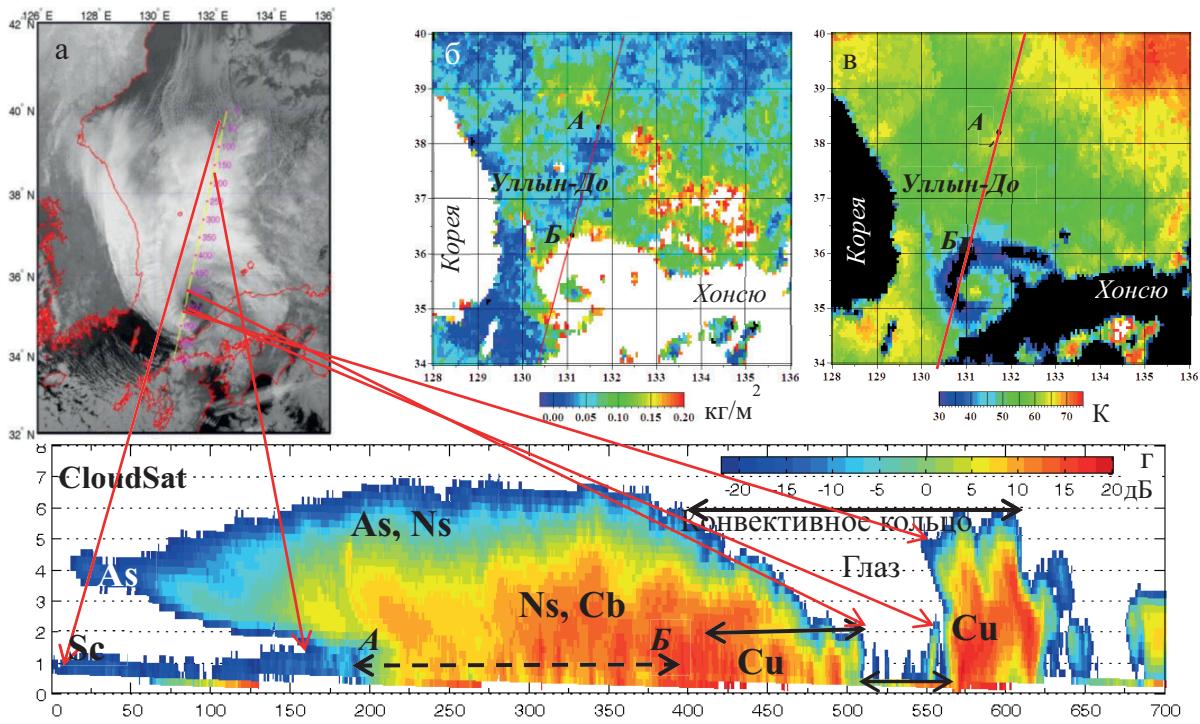


Рис. 4. Мезоциклон над южной частью Японского моря 11 февраля 2011 г.: ИК-изображение облачности по данным MODIS (а), водозапас облаков (б) и разность яркостных температур на частоте 36,5 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях (в) по данным AMSR-E за 17:20 Гр.; вертикальный профиль РЛ-отражаемости облачности по измерениям CPR со спутника CloudSat (г) за 17:23 Гр. Шкала РЛ-отражаемости в дБ

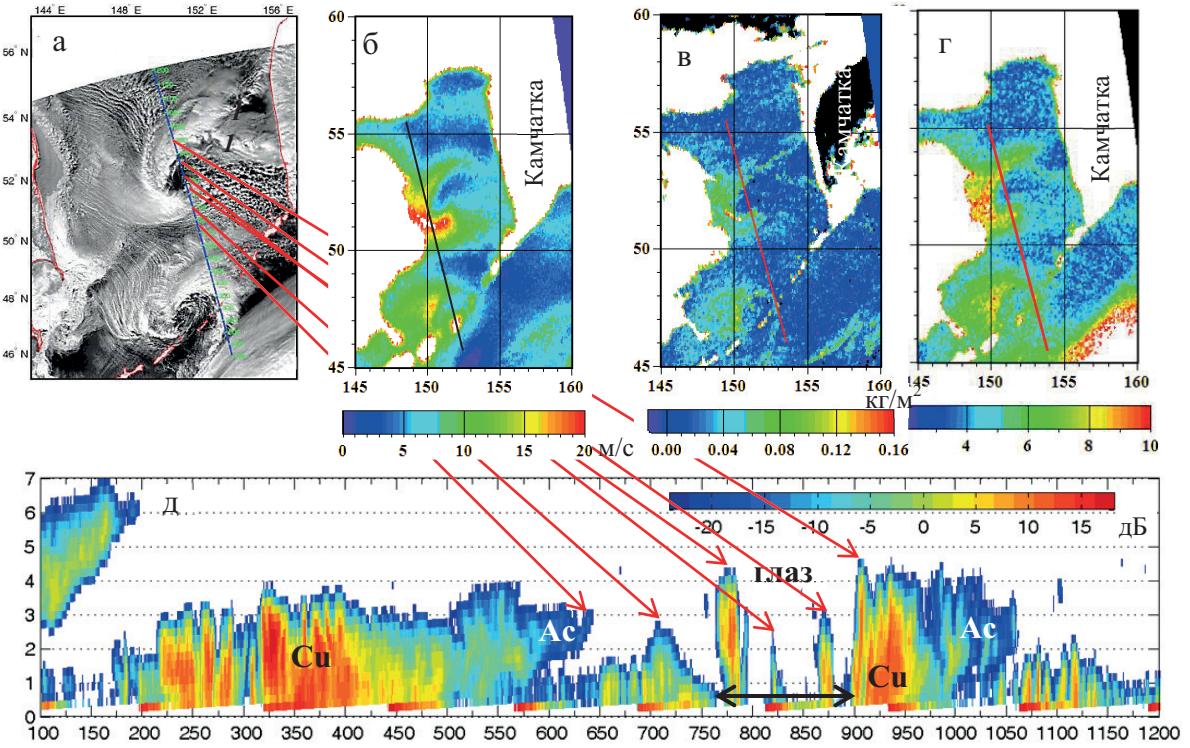
Детальное представление о вертикальной структуре облачности МЦ дает сечение радиолокационной отражаемости, полученное по данным зондирования радиолокатора *CPR* со спутника *CloudSat* через 3 мин после измерений *AMSR-E* (рис. 4г). *CPR* является первым спутниковым радиолокатором, предназначенным для измерения макро- и микрометеорологических характеристик облачных систем. *CloudSat*, запущенный в 2006 г., входит в группировку спутников *A-Train* и следует за спутником *Aqua* (Matrosov, 2007). Разрез проходит через западную окраину центральной части МЦ. На рисунке хорошо виден малооблачный глаз в виде воронки с наклоном к северу. Размер западной части глаза у подстилающей поверхности около 40 км. Внутри глаза радиолокатор зондирует отдельные маловодные облака и узкие конвективные спирали высотой до 1,5 км, в южной его части пересекает кучевую облачность высотой немногого более 2 км, которая примыкает к стене глаза. Размер центральной части МЦ, состоящей непосредственно из конвективных облачных спиралей, ~ 250 км. К югу от глаза конвекция достигает высоты 5–6 км, к северу верхняя граница облаков постепенно повышается от 2 до 5 км. К центральной части МЦ с севера примыкает массив облачности слоистых форм, по структуре сходный с системой облаков теплого фронта. На разрезе хорошо видно, как теплый воздух натекает на клин холодного и втягивается в циркуляцию МЦ. В северном секторе МЦ на разрезе виден тонкий слой мелкокапельной слоисто-кучевой облачности (Sc), которая характеризуется радиолокационной отражаемостью от –10 до –15 дБ. Над ним на расстоянии примерно

от 400 до 500 км от центра плотные слоисто-дождевые (Ns) и кучево-дождевые (Cb) облака с радиолокационной отражаемостью 10–20 дБ переходят в маловодные высоко-слоистые (As), в которых радиолокационная отражаемость постепенно понижается и принимает значения от –5 до –15 дБ. Верхняя граница облачности достигает высоты 5–6 км, местами до 7 км. Облачная система МЦ представляет собой комбинацию конвективного циклонического вихря – непосредственно облачности МЦ – и облачности, характерной для теплого фронта и втянувшейся в циркуляцию МЦ в процессе его развития. Мезоциклоны, чья облачность имеет признаки облачной системы теплого фронта, характерны для южной части Японского моря, что, по всей видимости, является его региональной особенностью.

В конвективном кольце вокруг глаза на участках, где поляризационная разность  $\Delta T_{\text{я}}(36) = T_{\text{я}}(36B) - T_{\text{я}}(36G) \leq 30$  К (рис. 4в) и  $Q > 0,2$  кг/м<sup>2</sup> (рис. 4б), вероятны жидкие осадки. На участке АБ, несмотря на высокие значения РЛ-отражаемости (7–18 дБ) и плотную облачность, значения  $Q$  очень малы ( $\sim 0,02$ – $0,06$  кг/м<sup>2</sup>), а поляризационная разность  $\Delta T_{\text{я}}(36) \approx 60$  К. Такое соотношение РЛ-отражаемости и водозапаса обусловлено, вероятно, наличием ледяных кристаллов в маловодных облаках (Matrosov, 2007, 2012). Метеостанция Уллын-До в 18 Гр. 11 февраля регистрировала в этом районе слабый непрерывный обложной снег.

### Два мезоциклиона над Охотским морем 16 февраля 2010 г.

На видимом изображении **MODIS** (спутник *Aqua*) за 02:55 Гр. 16 февраля 2010 г. отображены два МЦ размером  $\sim 450$  км с глазом  $\sim 125$  км (рис. 5а). В поле облачности видны две вихревые цепочки 1, которые тянутся от побережья Камчатки к центру северного МЦ. Такие вихревые структуры обычно связаны с орографией побережья. Циклоническая циркуляция отчетливо проявляется в поле приводного ветра по измерениям скаттерометра **ASCAT** (спутник *MetOp*) за 00:44 Гр. Скорость ветра в МЦ по данным скаттерометра составляет 12–15 м/с. По измерениям **AMSR-E** через 2 час после измерений скаттерометра ветер в юго-западном секторе северного МЦ усилился до 20 м/с, в южном – до 12–17 м/с (рис. 5б). Мезоциклоны развивались на фоне умеренных турбулентных потоков тепла из океана в атмосферу. Потоки явного тепла составляли 220–280 Вт/м<sup>2</sup>, максимальные их значения регистрировались в зонах максимальных ветров. Потоки скрытого тепла составляли 120–160 Вт/м<sup>2</sup> с максимальными значениями в области наиболее развитой конвекции. Северный МЦ интенсивнее южного, что проявляется в более ярком тоне конвективной облачности и в высоте ее верхней границы, а также в полях приводного ветра, капельной влаги и водяного пара (рис. 5а-г). В поле капельной влаги отчетливо отображается структура орографических вихревых цепочек (рис. 5в). По данным **MODIS** о температуре на верхней границе облаков высота облачности южного МЦ – 2,5–3 км, а местами конвекция достигает 4 км. В северном мезоциклоне облачность распространяется до высоты 4–4,5 км.



*Рис. 5. Два мезоциклона над Охотским морем 16 февраля 2010 г.: видимое изображение (а) по данным MODIS, поля приводного ветра (б), капельной влаги (в) и водяного пара (г) по данным AMSR-E (спутник Aqua) за 02:55 Гр.; вертикальный профиль РЛ-отражаемости облачности по измерениям CPR со спутника CloudSat за 02:59 Гр. (д). Шкала РЛ-отражаемости в дБ*

Более точные значения высоты верхней границы облачности и детальное представление о ее структуре дает вертикальный разрез через облачность МЦ по данным радиолокатора *CPR* со спутника *CloudSat* (рис. 5д). Измерения со спутника *CloudSat* были выполнены через 4 мин после измерений со спутника *Aqua*. Разрез проходит через восточную часть облачной спирали южного МЦ и центральную часть северного. Как следует из величины РЛ-отражаемости (~ 10–20 дБ), облачная спираль южного МЦ состоит из мощных кучевых облаков с высотой верхней границы 3–4 км, содержащих крупные капли и кристаллы (Matrosov, 2007, 2012). По мере продвижения к северной периферии МЦ облачность постепенно переходит в мелкокапельную высоко-кучевую (Ac) с радиолокационной отражаемостью от –15 до –20 дБ. Высота верхней границы гряд мелкокапельной слоисто-кучевой облачности (Sc) между мезоциклонами не превышает 1–1,5 км. В южном секторе северного МЦ верхняя граница облачности достигает высоты 3 км, а затем постепенно снижается к внутренней границе облачной спирали. Отчетливо видна структура глаза. Внутри глаза зондируются отдельные кучевые облака и облачные полосы, достигающие высоты 2–3 км. На его южной границе в поле облачности видны маленькие яркие точки – кластеры мощных кучевых облаков, через один из которых проходит сечение. Распределение в нем РЛ-отражаемости характерно для распределения водности в мощном кучевом (Cu cong) или кучево-дождовом (Cb) облаке и в центральной части составляет 10–13 дБ. Высота верхней границы этого облачного кластера немногого выше 4 км. К северу

от глаза облачная спираль состоит из мощных кучевых облаков с высотой верхней границы до 4–4,5 км и с РЛ-отражаемостью 10–13 дБ. К внешней границе циклонического вихря толщина облачного слоя уменьшается. Мощная кучевая облачность переходит в высоко-кучевую, в которой значения РЛ-отражаемости постепенно понижаются до –20 дБ, что обусловлено изменением фазового состояния облаков.

## Выводы

ДВ моря являются регионом активного мезомасштабного циклогенеза в холодное полугодие. Температурный режим ДВ морей и особенности синоптических процессов оказывают влияние на механизмы зарождения и структуру облачной системы формирующихся над ними МЦ. Исследование характеристик наиболее часто встречающихся над Японским и Охотским морями МЦ показало значительные различия в структуре и формах их облачности. МЦ над южной частью Японского моря превосходят МЦ над его северной частью и над Охотским морем по вертикальной мощности облачности и интегральному содержанию водяного пара и капельной влаги в атмосфере. Вероятно, эти различия обусловлены большими горизонтальными градиентами температуры поверхности Японского моря в холодный сезон. Часть облачности МЦ над южной частью Японского моря состоит из облаков слоистых форм, что характерно для облачной системы теплого фронта. Облачная система МЦ над Охотским морем состоит преимущественно из конвективных облаков. Измерения радиолокатора **CPR** (спутник *CloudSat*) дают детальное представление о структуре, вертикальной протяженности и фазовом состоянии облачности МЦ и существенно дополняют данные **MODIS** и **AMSR-E** (спутник *Aqua*). По измерениям **CPR** видно, что максимальная толщина облачного слоя охотоморских МЦ примерно на 3 км меньше, чем МЦ над южной частью Японского моря.

Комплексный анализ данных активного и пассивного микроволнового спутникового зондирования в сочетании с измерениями в других спектральных интервалах обеспечивает более плотный временной ряд количественных оценок параметров атмосферы и океана в зоне влияния МЦ, что важно для изучения механизмов их зарождения, структуры и эволюции.

Авторы благодарят Л.М. Митника (Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН) за консультации по вопросам микроволновой радиометрии и Японское аэрокосмическое исследовательское агентство JAXA за предоставление данных AMSR-E для выполнения проекта №. F10 по спутнику GCOM-W1 (Global Change Observation Mission) по соглашению между ТОИ и JAXA. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 11-05-00111 и ГК №16.420 Мировой океан.

## Литература

1. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 34–41.
2. Митник Л.М., Митник М.Л. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
3. Claud C., Heinemann G., Rausstein E. et al. Polar low le Cygne: Satellite observations and numerical simulations // Quart. J. Royal Meteorol. Society. 2004. V. 130. No 598. P. 1075–1102.
4. Gang F. Polar Lows: Intense Cyclones in Winter. Qindao, China. 2000. 218 p.
5. Matrosov S.Y. Potential for attenuation-based estimations of rainfall rate from CloudSat // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34, L05817, doi:10.1029/2006GL029161.
6. Matrosov S.Y. Observations of Wintertime U.S. West Coast Precipitating Systems with W-Band Satellite Radar and Other Spaceborne Instruments // Journal of Hydrometeorology. 2012. V. 13. P. 223–238.
7. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // Radio Science. 2003. V. 38. No. 4. 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
8. Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. 612 p.

### **Research of characteristics of intensive mesoscale cyclones over the Far Eastern Seas on the basis of satellite multisensor sounding**

**I.A. Gurvich, M.K. Pichugin**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS  
690041, Vladivostok, Baltiyskaya Street, 43  
e-mail: gurvich@poi.dvo.ru*

150–250 mesocyclones (MC) with wind speeds  $\geq 12$  m/s are typical formed over the Far Eastern seas in the cold season. The MCs developing over the Okhotsk Sea are different from ones of the Sea of Japan on structure of cloud system and atmospheric parameters. MCs parameters, such as sea surface wind speed, the total atmospheric water vapor and cloud liquid water content et al, and structure of cloudiness are investigated using complex data obtained from spectroradiometer MODIS, microwave radiometer AMSR-E from the Aqua satellite and also W-band Cloud Profiling Radar (CPR) from the CloudSat satellite.

**Keywords:** mesoscale cyclones, multisensor satellite sounding, atmospheric water vapor and cloud liquid water content, sea surface wind, cloudiness structure.