

Е. В. Заболотских, Л. П. Бобылев, А. В. Дикинис

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШТОРМОВЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

E. V. Zabolotskich, L. P. Bobilev, A. V. Dikinis

USE REANALYSIS DATA AND SATELLITE MEASUREMENTS ESTIMATES FOR THE QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF STORM MEZOTSIKLONOV

В данной статье рассматриваются основные факторы формирования штормовых циклонов и методика их изучения. Так же в статье рассмотрены методика расчета количественных характеристик активных циклонических образований и использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов. Предлагаемые методы расчета количественных характеристик рассмотрены для ряда мезомасштабных циклонов.

Ключевые слова: штормовые циклоны, мезомасштабные циклоны, активные циклонические образование, космическая съемка, мультисенсорное зондирование, количественные характеристики.

This article examines the main factors of storm cyclones and methodology of their study. In the article are also examined the method of calculating the quantitative characteristics of the active cyclonic and the use of multi-sensing data for studying the characteristics of storm cyclones. Methods for calculating the quantitative characteristics for a number of mesoscale cyclones are proposed.

Key words: storm cyclones, mesoscale cyclone active cyclone formation, space/satellite imagery, multisensory sensing, quantitative characteristics

Введение

Необходимость и актуальность исследований, основанных на совместном анализе спутниковых и модельных данных.

Атмосфера является чрезвычайно подвижной средой, где постоянно формируются и разрушаются вихри различных масштабов. Наиболее крупные атмосферные вихри синоптического масштаба достигают в диаметре нескольких тысяч километров, время жизни подобных систем может достигать недели и более. Мезомасштабными циклонами (МЦ) называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами 100-1000 км, которые зарождаются и продол-

жают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Хотя мезомасштабные циклоны и представляют собой нефронтальные образования, они чаще всего возникают в пределах фронтальных циклонических циркуляций синоптического масштаба на фоне относительно низкого давления. Отдельно в категории мезомасштабных циклонов выделяются полярные циклоны — погодные системы исключительной интенсивности, развивающиеся в умеренных и высоких широтах как результат «взрывного» циклогенеза, и характеризующиеся быстрым развитием (время жизни от нескольких часов до нескольких суток), и штормовыми скоростями ветра [4, 15].

Штормовые циклоны (скорость ветра в которых достигает 15 м/с и более) обычно развиваются в наиболее бароклинных зонах тропосферы. Это происходит в результате возникновения бароклинных атмосферных волн длиной порядка тысячи километров и более. На первой стадии развития в циклоне большие контрасты температуры обусловлены тем, что он состоит из двух разных воздушных масс. Под влиянием адвекции холодной воздушной массы в циклоне формируется вихрь холодного воздуха, и вертикальная мощность его возрастает [2]. Как показывают исследования последних лет, количество штормовых циклонов, особенно над Северной Атлантикой и Балтикой, растет от года к году [9].

Сильный ветер, характерный для штормовых циклонов как синоптического, так и мезомасштабов, усиливает волнение моря и обрушение волн, что при низких температурах воздуха, характерных для морей Северного Ледовитого Океана, может привести к быстрому обледенению судов. Эти особенности представляют серьезную опасность для находящихся в море судов и хозяйственной деятельности прибрежных районов. Кроме того, транспортное морское судоходство, безопасность нефтяных платформ также напрямую связаны с этими штормовыми образованиями. Поэтому своевременное обнаружение и оценка характеристик штормовых циклонов являются крайне актуальной задачей для обеспечения безопасности мореплавания, рыбного и нефтяного промысла и все возрастающего прибрежного строительства в России.

Особенно трудно изучать и предсказывать штормовые мезоциклоны, поскольку большинство численных прогнозов погоды не обладают достаточным временным и пространственным разрешением, пригодным для их исследования. Из-за редкой сети береговых метеостанций и нерегулярных судовых метеорологических наблюдений в море, быстрого перемещения и короткого жизненного цикла мезоциклоны далеко не всегда выявляются в поле давления на фактических приземных картах погоды. В то же время, разрушительная сила мезоциклонов не уступает штормовым циклонам синоптического масштаба [15].

Таким образом, несомненно, что изучение характеристик штормовых циклонов, включая мезоциклоны, отслеживание их движения и, по возможности, прогнозирование, представляют одну из важнейших, до сих пор не решенных задач современной науки. Особую актуальность для российской науки эти исследования приобретают в связи с резким уменьшением в последние годы площади Северного Ледовитого Океана, покрытой многолетними морскими льдами [11]. Причиной сокращения площади ледяного покрова в Арктике становится наблюдаемое значительное потепление климата. Оно наслаивается на погодные явления, которые также вызывают

уменьшение льдов. В 2007 году была зафиксирована минимальная площадь льдов [11]. С появлением новых районов открытой воды связано появление новых районов, потенциально пригодных для зарождения полярных циклонов. Такие моря, как Восточно-Сибирское, Чукотское, море Лаптевых, раньше закрытые ледяным покровом в течение всего года, к осени становятся свободными ото льда, а значит, подверженными возникновению и развитию полярных циклонов. Предварительные исследования подтверждают этот вывод.

Появление в последние годы спутников, оснащенных активными и пассивными микроволновыми приборами, обладающих более высоким разрешением и широкой полосой обзора, значительно расширило возможности, связанные с получением информации о штормовых циклонах [1]. В сочетании со спутниковыми изображениями облачности, с данными гидрометеорологических станций на побережье и результатами моделирования это дает возможность исследовать зарождение и эволюцию циклонов со значительно более высоким временным разрешением, детальностью и точностью, чем это было возможно ранее.

Изображения радиолокаторов с синтезированной аппертурой (PCA), например, RADARSAT Synthetic Aperture Radar (SAR), Envisat Advanced SAR (ASAR) представляют собой ценнейший источник информации, так как обладают высоким разрешением и обеспечивают исследователей детальной структурой поля приводного ветра независимо от погодных условий [10]. Дополнительным источником информации о поле ветра служат данные скаттерометров, например, данные Quik SCAT Sea winds скаттерометра (до сентября 2009 года) и Metop ASCAT скаттерометра [13]. Хотя разрешением такие данные существенно уступают данным PCA, регулярность их получения (более 2-х раз в сутки) расширяет возможности их использования.

Штормовые циклоны, в том числе, полярные циклоны, отчетливо проявляются на снимках видимого и инфракрасного диапазонов (спектральные радиометры MODIS на спутниках Terra и Aqua, радиометры AVHRR на серии спутников NOAA) [6]. Однако, несмотря на увеличивающуюся доступность и частоту таких изображений, они отражают только структуру верхнего слоя облачности, поэтому при использовании требуют привлечения дополнительных данных [15].

Уникальные возможности для изучения полярных циклонов могут обеспечить данные многоканальных сканирующих спутниковых радиометров, таких как Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) и Special Sensor Microwave Imager and Sounder (SSMIS) на борту спутников серии Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP) и Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System (AMSR-E) на борту Aqua [12]. Так же, как и перечисленные выше приборы, эти радиометры регистрируют излучение в широкой (около 1400 км) полосе обзора. Кроме того, последний радиометр AMSR-E обладает более высоким, по сравнению с радиометром SSM/I, разрешением. Измерения SSM/I и AMSR-E дают возможность восстанавливать такие характеристики атмосферы и океана как интегральное содержание водяного пара в атмосфере, интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаках, скорость приводного ветра. Данные микроволновых радиометров Advance Microwave Sounding Unit (AMSU) на борту спутников NOAA позволяют получать поля жидких осадков и содержания кристаллической воды в облаках. Регулярность (в полярных районах

временное разрешение составляет несколько раз в сутки), независимость от времени суток и погодных условий делает их бесценным источником информации, а наличие точных методов определения различных геофизических параметров, позволяет получать не только качественную картину зарождения, движения и заполнения циклонов, но и количественно оценивать их характеристики.

В течение нескольких последних декад основную массу работ, связанных с изучением структуры и развития штормовых мезоциклонов, представляли исследования в виде рассмотрения и анализа конкретных случаев циклонов. Стремление обобщить и классифицировать штормовые циклоны базировалась как на их проявлениях на спутниковых изображениях, так и на изучении механизмов их формирования, обусловленных той или иной синоптической ситуацией. Анализ синоптической ситуации проводился как с использованием фактических данных (карт приземного анализа), так и с привлечением модельных данных (например, данных реанализа).

Наиболее перспективным при изучении штормовых циклонов представляется совместное использование данных различных приборов, позволяющее провести наиболее полный анализ погодной системы с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации.

В настоящей работе предлагается методология изучения штормовых циклонов, включая мезоциклоны, основанная на комбинации количественного анализа синоптической ситуации и использования спутниковых данных, включающего как анализ снимков в различном диапазоне электромагнитного спектра, так и расчет параметров системы атмосфера-океан по данным спутниковых многоканальных сканирующих радиометров.

Методология

1. Методика расчета количественных характеристик активных циклонических образований

Для возникновения мезоциклона необходимо, чтобы в какой-либо крупномасштабной циркуляционной системе существовало (или вновь образовалось) мезомасштабное возмущение или неоднородность масштаба мезо- α . Например, завихренность в свободной атмосфере (следствие существующего или существовавшего фронтального циклона), мезомасштабная фронтальная или ветровая волна, мезофронт (на границе суша — море, на границе ледового покрова и т. п.). Любое подобное возмущение (неоднородность) может дать начало мезовихрю конвективного происхождения либо мезоциклону. Последний разовьется, если мезовозмущение попадет в условие горизонтальной неоднородности полей температуры и влажности синоптического масштаба, т. е. если возмущение окажется в условиях бароклинной неустойчивости. В процессе развития мезоциклона бароклинность возрастает, так как происходит, с одной стороны, приток влажного и теплого воздуха, а с другой — сухого и холодного [3].

Динамическая неустойчивость атмосферы является одним из необходимых условий возникновения возмущения синоптического масштаба. Однако и прямо, и косвенно она участвует в генерации малых возмущений. Так, при возникновении мезоциклонов наличие динамической неустойчивости непосредственно влияет на фор-

мирование этих возмущений. Иницируя процесс крупномасштабного циклогенеза, динамическая неустойчивость, тем самым, косвенно влияет на формирование малых возмущений, так как возникающая циклоническая циркуляция способствует разрешению статической неустойчивости. Для количественной оценки динамической неустойчивости существует множество различных показателей. Наиболее общим из них является показатель, который включает в себя как баротропную (два первых члена в правой части уравнения 1), так и бароклинную неустойчивость (третий член в правой части уравнения 1). В умеренных и высоких широтах баротропными членами можно пренебречь, так как они, по крайней мере, на порядок меньше третьего, бароклинного, члена [3].

$$DI = \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\partial^2 V}{\partial n^2} + \frac{l^2}{\sigma} \frac{\partial^2 V}{\partial P^2}, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны линий тока, V – вектор скорости ветра, n – нормаль к линии тока, направленная вправо от направления течений, l – параметр Кориолиса, P – давление (Па)

$$\sigma = \frac{\partial \Phi}{\partial P} \frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial P}, \quad (2)$$

где Φ – геопотенциал ($\text{м}^2/\text{с}^2$), P – давление (Па), θ – потенциальная температура.

Циклогенез является процессом, охватывающим практически всю тропосферу. Поэтому в данной работе при расчете динамической неустойчивости была принята во внимание бароклинность наиболее активной части тропосферы, то есть в слое от 850 до 300 гПа. Использовался безразмерный параметр динамической неустойчивости:

$$D = \frac{DI_{850}^{500} + DS_{700}^{300}}{2 \cdot 10^{-10}}, \quad (3)$$

где DI_{850}^{500} – показатель неустойчивости в слое 500-850 гПа, DS_{700}^{300} – в слое 300-700 гПа.

Для возникновения мезоциклона необходимо выполнение еще одного динамического условия. Таким условием является *спиралевидность движения*:

$$Sp = V \text{rot} V \approx v \frac{\partial u}{\partial z} - u \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (4)$$

Спиралевидность математически определяется как скалярное произведение вектора на завихренность, и относится к числу важнейших динамических характеристик вихревого течения [3]. Также спиралевидность можно определить как меру наклона оси вихря по отношению к вектору скорости течения воздуха [5]. В работе спиралевидность вычислялась в виде ее суммарного значения для слоев: 700-850, 500-700 и 300-500 гПа. для определения безразмерного параметра спиралевидности суммарное значение нужно отнести к среднему значению спиралевидности при циклогенезе $\bar{Sp} \approx 1.13 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Интенсивность термической адвекции (переноса тепла при горизонтальном движении воздуха) определяется величиной той части локального изменения температу-

ры, которая зависит от этого процесса. Термическая адвекция выражается скалярным произведением $V \cdot \nabla T$, где V — скорость течения, а ∇T — горизонтальный асцендент температуры. Скорость V по величине и направлению определяется барическим градиентом, будучи перпендикулярна к нему. Если барический и температурный градиенты параллельны, т. е. если абсолютные и относительные изогипсы параллельны, то термическая адвекция равна нулю. Напротив, при взаимной перпендикулярности обоих градиентов, т. е. при перпендикулярности абсолютных и относительных изогипс, термическая адвекция достигает максимального значения. Влияние адвекции тем больше, чем больше горизонтальный градиент температуры воздуха, чем больше скорость ветра и чем больше совпадают по направлению оба эти вектора.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{dt} - \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Там, где совпадают наибольшие значения DI и Sp , можно ожидать развития мезоциклона из первоначального возмущения (неоднородности). Однако даже при наличии благоприятных динамических условий мезоциклон не возникнет, если поле движений кинематически не подготовлено соответствующим образом. Мезоциклон возникнет только в том случае, если в области совпадения наибольших значений DI и Sp пересекаются изолинии кинематических характеристик:

$$c = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (6)$$

В настоящей работе для отобранных случаев штормовых циклонов по формулам (1-4) был проведен расчет величин показателя динамической неустойчивости, спиральности атмосферного движения и адвекции воздушной массы с использованием данных реанализа NCEP/NCAR.

2. Использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов

Численные модели атмосферы, предсказывающие на основании анализа начальных условий ее будущее состояние, являются важнейшим инструментом изучения мезомасштабных штормовых циклонов и предсказания их возникновения и развития. Однако, небольшой размер полярных циклонов, относительно высокая степень влияния внутренних механизмов воздействия, таких как высвобождение скрытого тепла, быстрая эволюция, большой диапазон интенсивностей и отсутствие данных наблюдений усложняют задачу моделирования этих мезомасштабных погодных систем. При изучении работ, связанных с удачным численным моделированием некоторых случаев полярных циклонов, продемонстрировавших адекватное соответствие данным наблюдений, следует иметь в виду, что большая часть случаев отсутствия подобного соответствия не попала в опубликованные работы. Пример подобного случая приведен в работе [14]. Данный полярный циклон предпринимали попытку описать при помощи численного моделирования разные авторы, и у всех она оказывалась неудачной: никто не мог спрогнозировать наблюдаемую эволюцию циклона.

В связи с этим, привлечение в исследованиях мезомасштабных циклонов спутниковой информации остается насущной необходимостью, поскольку, являясь инструментом для валидации численных моделей, спутниковые измерения также позволяют получить всестороннюю и наиболее полную информацию — как качественную, так и количественную — об этих опасных атмосферных явлениях.

Использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов основывается на привлечении как можно большего количества спутниковых измерений приборов в различных областях электромагнитного спектра с целью получения наиболее полной качественной и количественной информации о циклоне в наиболее высоком временном разрешении. В дополнение к спутниковым измерениям при этом используются все доступные контактные измерения, такие как, измерения скорости приводного ветра океаническими буями, измерения профилей атмосферных метеопараметров радиозондами, синоптические наблюдения и др.

Предлагаемая методология изучения штормовых мезоциклонов на настоящий момент базируется на использовании данных следующих приборов:

- 1) Снимков видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектрорадиометров MODIS на спутниках Terra и Aqua и AVHRR на спутниках серии NOAA.

Исторически методы интерпретации снимков начали развиваться самыми первыми. Главной отличительной чертой их является субъективность, поскольку сами методы представляют из себя визуальный анализ изображений облачности в видимом и инфракрасном диапазонах. Тем не менее, спутниковые данные ИК и видимого диапазонов обеспечивают нас ценнейшей информацией о форме и структуре облачности, ассоциированной с развитием мезомасштабных циклонов. Эта информация позволяет судить о воздушных массах и физических процессах, вовлеченных в образование рассматриваемых систем. Видимые и ИК изображения дают возможность определять расположение циклонов и температуру верхних слоев облачности. При наличии близко расположенных данных радиозондирования или обоснованных модельных атмосферных профилей, по этим данным может быть оценена высота верхней границы облаков. Снимки позволяют примерно оценить диаметр циклона, хотя не всегда его облачная структура может быть прямо отнесена к поверхностным проявлениям без привлечения дополнительных данных. Также, данные видимого и инфракрасного диапазонов позволяют судить о времени жизни циклона. Поскольку мезоциклоны, включая полярные циклоны, формируются за счет различных физических механизмов, в зависимости от природы этих механизмов различаются и форма и структура облачности: разные типы вихрей обладают разными облачными сигнатурами, четко идентифицируемыми на видимых и ИК изображениях. Среди типичных проявлений полярных циклонов в структуре облачного покрова выделяются такие сигнатуры как облачная запятая, спиралевидные структуры, мгновенные окклюзии, сигнатуры в форме лебедя, бароклинные волны и др. К сожалению, все достоинства рассматриваемого анализа сводятся к нулю, если мезомасштабный циклон, представляющий собой в значительной мере поверхностное явление, закрыт сверху слоем облаков, не позволяющих сигналу от облачности, связанной с развитием циклона, достичь датчика спектрорадиометра. В этом случае анализ изображений может быть как затруднен, так и вовсе невозможен.

2) Изображений РСА со спутников RADARSAT и Envisat.

Высокое пространственное разрешение данных РСА позволяет независимо от облачности и времени суток визуально идентифицировать в полях приводного ветра вихревые структуры даже небольших размеров, выходящих за рамки возможностей других приборов. Помимо вихревых структур мезомасштаба, РСА снимки отражают вариации приводного ветра микромасштаба, что обеспечивает возможность изучения таких деталей атмосферных процессов, которые оказываются за рамками возможностей пространственного разрешения любых других приборов. Подавляющее большинство микро- и мезомасштабных проявлений атмосферных процессов на РСА-изображениях поверхности океана коррелируют с облачными сигнатурами соответствующих явлений на снимках видимого и ИК-диапазонов. Низкое и нерегулярное временное разрешение приборов в сочетании с высокой стоимостью снимков существенно ограничивают использование этого спутникового ресурса в изучении мезовихрей.

3) Полей ветра низкого разрешения (12.5 км) по данным скаттерометров Seawinds со спутника QuikSCAT до ноября 2009 года и ASCAT со спутника Metop с марта 2009.

Недостаток снимков РСА, связанный с их редкостью и стоимостью, частично могут восполнить данные активных микроволновых скаттерометров, которые отличаются регулярностью, широкой полосой обзора (1400 км для QuikSCAT Seawinds и две полосы по ~500 км) и доступностью. Скаттерометрические измерения также позволяют восстанавливать поля приводного ветра независимо от облачности и времени суток, но уже с существенно более низким разрешением

4) Спутниковых данных сканирующих микроволновых радиометров SSM/I и SSMIS на борту серии спутников DMSP пространственного разрешения 25 км и радиометра AMSR-E на борту спутника Aqua пространственного разрешения 10 км.

Как было отмечено во введении, широкая полоса обзора (1400 км), высокое временное разрешение (до 6 раз в сутки для широт выше 70° с.ш.), независимость от времени суток и погодных условий, возможность восстановления целого ряда геофизических параметров атмосферы и океана, позволяют с успехом использовать эти данные для изучения любых атмосферных явлений, в том числе, и для изучения мезовихрей. Авторами работы [7] были созданы алгоритмы оценки полной массы водяного пара (влагозапаса) в атмосфере Q и жидкокапельной влаги (водозапаса) облаков W, обладающие повышенной точностью при неблагоприятных погодных условиях. Было доказано [8], что мезомасштабные циклоны имеют четко выраженную вихревую сигнатуру в поле атмосферного водяного пара. Изучение полей водяного пара, полученных при помощи менее точных алгоритмов, показало, что для идентификации циклонов в полях водяного пара точность алгоритма имеет решающее значение. Перспективность использования восстановленных полей Q в качестве основного источника информации о мезомасштабных циклонах связана с независимостью от верхних слоев облачности (в отличие от снимков спектральных радиометров), доступностью и регулярностью (в отличие от снимков РСА). Так же, как и скаттерометрические измерения, пассивные микроволновые данные позволяют восстанавливать скорость приводного ветра V, являющуюся главной отличительной характеристикой штормового циклона. Авторами разработан также алгоритм оценки V (неопубликованный) по данным AMSR-E.

Таким образом, пакет разработанных алгоритмов позволяет наиболее эффективным образом использовать рассматриваемые данные: детектировать мезомасштабные циклоны в полях атмосферного водяного пара, определять размеры, траекторию и время жизни атмосферных образований, оценивать их численные характеристики — Q , W , V , их минимальные и максимальные значения.

- 5) Продуктов спутниковых данных микроволновых зондировщиков AMSU-B на борту спутников NOAA пространственного разрешения 50 км.

Также, как и данные микроволновых сканирующих радиометров, данные зондировщиков отличаются регулярностью и высоким временным разрешением, особенно учитывая постоянное наличие на орбите нескольких спутников NOAA. Готовые продукты AMSU-B — это интенсивность дождя R и содержание кристаллической воды (льда) в облачности IWP . Сведения о данных параметрах повышают информативность исследования, дополняя данные других приборов, хотя низкое пространственное разрешение AMSU-B является существенным недостатком при исследовании мезомасштабных явлений.

3. Примеры применения методологии для ряда мезомасштабных циклонов

Применение описанной методологии проиллюстрировано несколькими примерами изучения мезомасштабных циклонов в Баренцевом море в марте 2010 года. Все рассмотренные атмосферные вихри относятся к категории полярных циклонов (ПЦ), т.е. отличаются интенсивностью, высокими скоростями приводного ветра и стремительным развитием. Климат Баренцева моря находится под влиянием тёплого Атлантического океана и холодного Северного Ледовитого океана. Частые вторжения тёплых атлантических циклонов и холодного арктического воздуха определяют большую изменчивость погодных условий. Зимой над морем преобладают юго-западные, весной и летом — северо-восточные ветры. В связи с этим, март представляется критическим для данного моря месяцем, когда преимущественное направление ветров и температурный режим способствуют образованию полярных циклонов.

Все обнаруженные мезомасштабные циклоны сформировались в результате так называемых холодных вторжений, когда воздушные массы с севера с температурой ниже -25°C , распространялись над тёплой (около $+3^{\circ}\text{C}$) открытой северной частью моря к северо-востоку от Новой Земли.

На Рис.1 представлены 2 инфракрасных изображения MODIS и изображение EnvisatASAR полярного циклона в Баренцевом море 5 марта 2010 года, развитие которого сопровождалось формированием спиралевидной структуры облаков и вихревой структуры штормового приводного ветра.

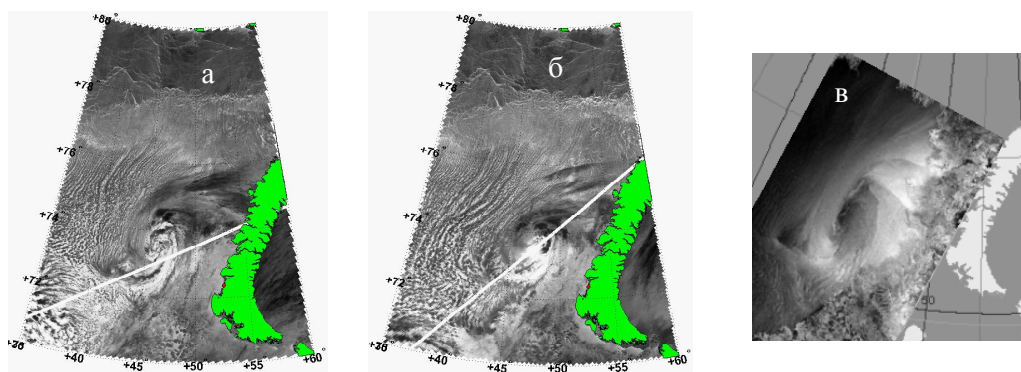


Рис. 1 – ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 5 марта 2011 г.
(а) – 8:45; (б) – 16:25 всемирного времени (BB) и (в) – изображение EnvisatASAR 8:00 BB

Данный циклон сформировался в результате холодного вторжения с севера в ночь с 4 на 5 марта. Временной ряд спутниковых данных не позволяет с уверенностью зафиксировать момент начала формирования ПЦ. Можно лишь утверждать, что вечером 4 марта ПЦ не детектировался ни одним из спутниковых приборов. Вторжение сухой холодной воздушной массы с севера, усиление северо-восточного ветра привели к соприкосновению холодного арктического воздуха с относительно теплой поверхностью Баренцева моря. Пограничный слой атмосферы стал неустойчивым, причем неустойчивость усиливалась вниз по потоку. Над морской поверхностью развилась упорядоченная конвекция, что проявилось в формировании конвективных облачных гряд, и ячеек, хорошо различимых на изображениях MODIS.

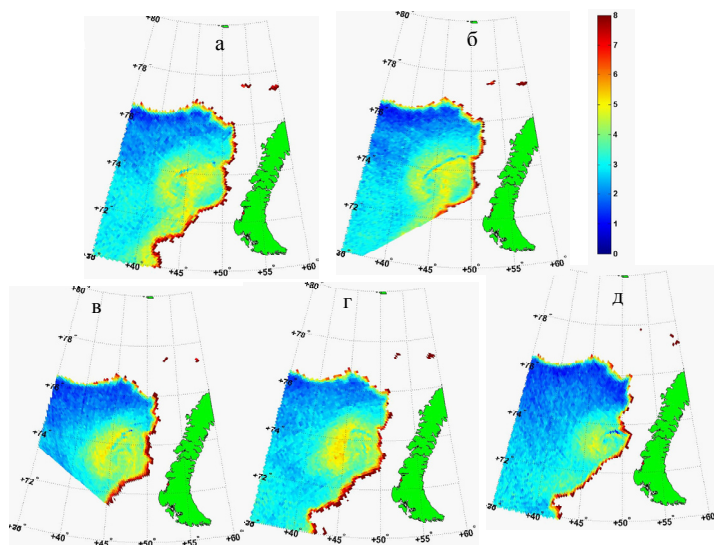


Рис. 2 – Поля влагозапаса атмосферы $Q(\text{кг/м}^2)$, восстановленного по данным AMSR-E
(а) – 00:58; (б) – 02:37; (в) – 06:44; (г) – 08:23 5 марта 2010 г. и (д) – 6 марта 2010 г. 00:03

Развитие и траектория полярного циклона хорошо прослеживаются по полям атмосферного водяного пара, восстановленного по данным AMSR-E (Рис. 2). В центре циклона наблюдается минимум водяного пара около 3 кг/м^2 . Максимальное значение водяного пара — 5.5 кг/м^2 . Следующий по времени микроволновый снимок AMSR-E свидетельствует о полной диссипации ПЦ ночью 6-го марта. Таким образом, данный мезомасштабный вихрь, диаметром около 500 км, просуществовал чуть более суток.

Характерные для полярного циклона высокие скорости ветра были подтверждены как скаттерометрическими измерениями MetopASCAT, так и восстановленными по данным AMSR-E полями скорости приводного ветра (Рис. 3).

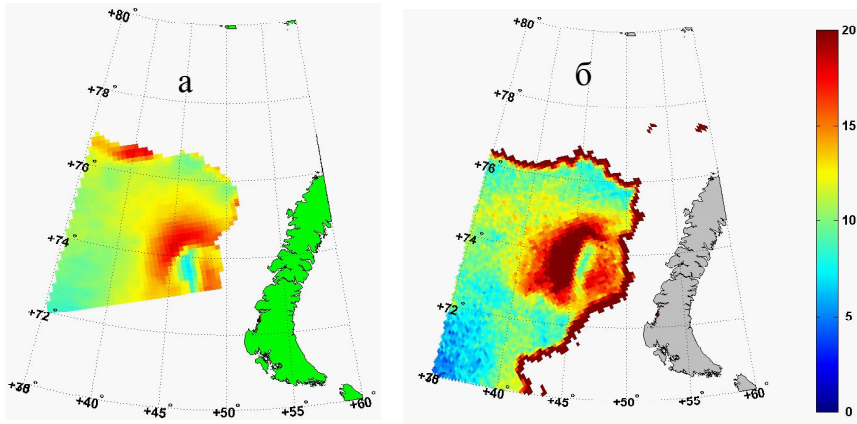


Рис. 3 — Скорости приводного ветра по данным MetopASCAT 5 марта 2010 11:25 (а) и по данным AMSR-E 5 марта 2010 8:43 (б)

Следующий циклон над той же самой территорией сформировался через несколько дней — 8 марта 2010 года. Данный циклон просуществовал всего несколько часов. Изображения циклона на снимках MODIS инфракрасного диапазона и EnvisatASAR представлены на рис. 4.

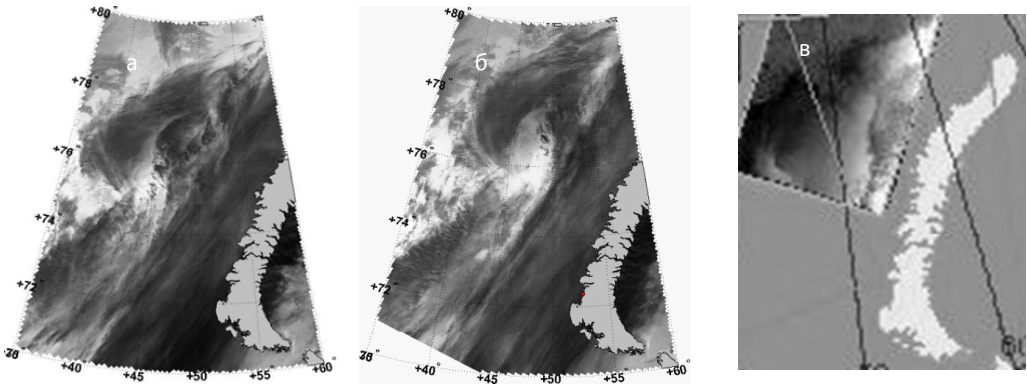


Рис. 4 — ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 8 марта 2011 г. (а) — 7:35; (б) — 8:50 и (в) — изображение EnvisatASAR 8:00

Поскольку время жизни данного полярного циклона составило около 6 часов 4 микроволновых снимка AMSR-E позволили получить и проанализировать поля водяного пара (Рис. 5) и скоростей приводного ветра (Рис. 6). Минимальное значение влагозапаса атмосферы составило 5.8 кг/м^2 , максимальное — 11.5 кг/м^2 . Скорость ветра в мезоциклоне превысила 22 м/с

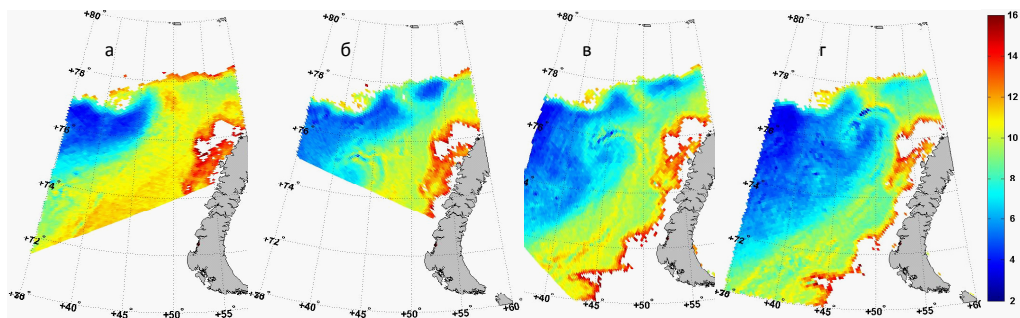


Рис. 5 — Поля влагозапаса атмосферы $Q \text{ (кг/м}^2\text{)}$, восстановленные по данным AMSR-E (а) — 02:48; (б) — 05:56; (в) - 07:35; (г) - 09:14 8 марта 2010 г.

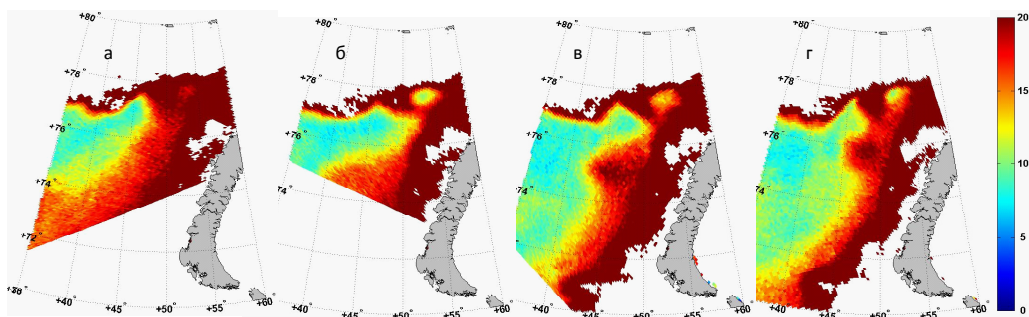


Рис. 6 — Поля приводного ветра $V \text{ (м/с)}$, восстановленные по данным AMSR-E (а) — 02:48; (б) — 05:56; (в) - 07:35; (г) - 09:14 8 марта 2010 г.

Наконец, последний из серии мезоциклонов в марте 2010 года сформировался над данным регионом 15 марта и просуществовал чуть более суток. ИК изображение облачности, сопровождающей циклон в стадии полного развития, и снимок Envi-satASAR, отражающий вихревую структуру приводного ветра, приведены на рис. 7. Развитие циклона, представленное в наблюдаемых изменениях полей атмосферного влагозапаса, изображено на рис. 8. В центре циклона наблюдается минимум водяного пара около 3.2 кг/м^2 . Максимальное значение влагозапаса — 4.2 кг/м^2 .

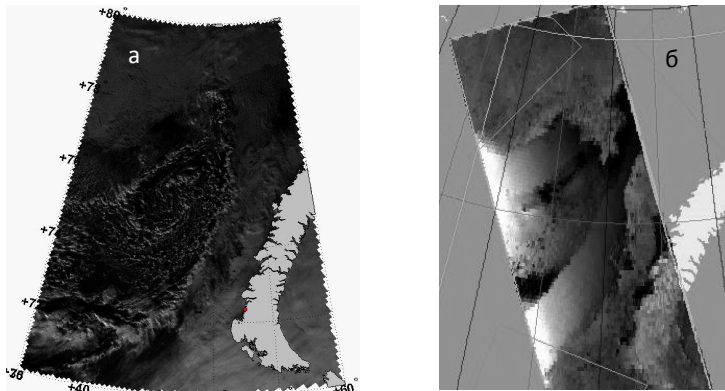


Рис. 7 – (а) ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 15 марта 2011 года – 10:35; и (б) – изображение EnvisatASAR 17:40

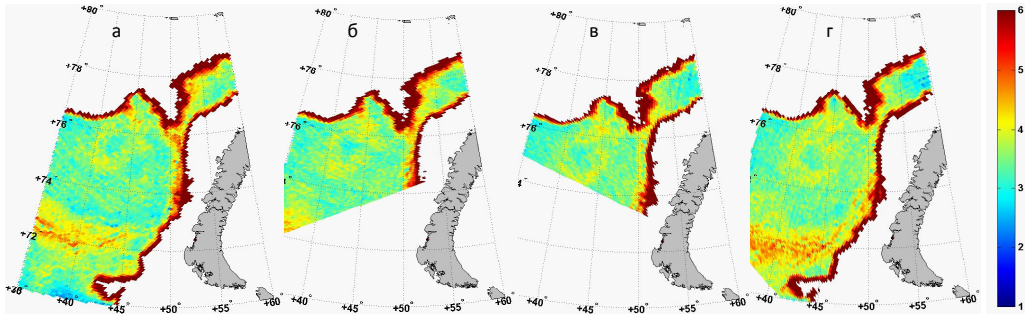


Рис. 8 – Поля влагозапаса атмосферы Q ($\text{кг}/\text{м}^2$), восстановленные по данным AMSR-E (а) – 01:15; (б) – 02:54; (в) – 06:02; (г) – 07:41 15 марта 2010 г.

Заключение

Необходимость расширения возможностей для исследований таких экстремальных явлений, как штормовые мезоциклоны, связана как с недостаточным пространственным и временным разрешением большинства численных моделей, так и с редкой сетью береговых метеостанций и нерегулярными судовыми метеорологическими наблюдениями в море. Быстрое перемещение и короткий жизненный цикл мезоциклонов дополнительно усложняют изучение этих явлений. В то же время, разрушительная сила штормовых мезоциклонов огромна. Сильные ветры с бортовой и килевой качкой, приводят к потере скорости, ограничению комфортности условий обитания моряков и рыбаков, создают угрозу безопасности судна и затрудняют проведение производственных операций. Поэтому своевременное обнаружение мезоциклонов и изучение их характеристик являются актуальной задачей современной науки.

Предложенная методология изучения штормовых циклонов, основанная на комбинации количественного анализа синоптической ситуации и использования

спутниковых данных, включающего анализ снимков в различном диапазоне электромагнитного спектра и построение полей параметров системы атмосфера-океан по данным спутниковых многоканальных сканирующих радиометров, направлена на преодоление ограниченности наземных метеорологических наблюдений, позволяющих диагностировать мезоциклоны. Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о ее применимости и возможности совместного использования данных различных приборов для наиболее полного анализа погодных систем с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации.

Работа выполнена в рамках 1.2.2 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П1570 от 10 сентября 2009 г.) по направлению «Мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы и гидросферы».

Литература

1. *Гурвич И.А., Митник Л.М., Митник М.Л.* Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса, 2008(5) с. 58–73.
2. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И.* Интенсивные арктические мезоциклоны // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы, 2007, Т. 43(3), с. 291–297.
3. *Русин И.Н., Тараканов Г.Г.* Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. — СПб.: Изд-во РГГМУ, 1996 г. — 207 с.
4. *Степаненко В. М., Вельтищев Н. Ф.* Мезометеорологические процессы. — М.: Изд-во «Географический факультет МГУ», 2007. — 127 с.
5. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 263 с.
6. *Bader M.J., G.S. Forbes, J.R. Grant, R.B.E. Lilley and A.J. Waters.* Images in weather forecasting. Cambridge-University Press, Cambridge, UK, 1995, 523 P.
7. *Bobylev L. P., E. V. Zabolotskikh, L. M. Mitnik, and M. L. Mitnik.* Atmospheric Water Vapor and Cloud Liquid Water Retrieval over the Arctic Ocean Using Satellite Passive Microwave Sensing, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 48, No. 1, pp. 283 – 294, doi: 0.1109/TGRS.2009.2028018, 2010
8. *Bobylev L., E. Zabolotskikh, L. Mitnik, and M. Mitnik.* Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, special issue, 2011 (в печати).
9. *Bracegirdle T. J. and S. L. Gray.* An objective climatology of the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas // Int. J. Clim., 2008, vol.28, pp. 1903–1919.
10. *Chunchuzov I., Vachon P.W., Ramsay B.* Detection and characterization of polar mesoscale cyclones in RADARSAT Synthetic Aperture Radar images of the Labrador Sea // Canadian J. Rem. Sens. 2000, vol. 26, pp. 213–230.
11. *Comiso J. C., C. L. Parkinson, R. Gersten, and L. Stock,*2008, Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett., 35, L01703, doi:10.1029/2007GL03197.
12. *Mitnik L.M., Mitnik M.L., Gurchich I.A.* Passive and active microwave sensing of winter mesoscale cyclones over the ocean // Proc. IGARSS'06, Denver, Colorado, 31 July–4 August 2006.
13. *Monaldo F. M., D. R. Thompson, W. G. Pichel and P. Clemente-Col n.* A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface speeds // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2004, vol. 42, pp. 283–291.
14. *Rasmussen E.* A case study of a polar low development over the Barents Sea // Tellus, 1985, vol. 37A, pp. 407–418.
15. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. CambridgeUniversity Press, 2003, 612 P.