

Ю.Е. Смирнова, Е.В. Заболотских, Л.П. Бобылев, В.И. Сычев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ
В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОГО
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Yu. E.Smirnova, E.V. Zabolotskikh, L.P. Bobylev, V.I. Sychev

**POLAR LOW STUDY OVER THE BALTIC SEA
USING SATELLITE REMOTE SENSING MEASUREMENT DATA**

Рассматриваются мезомасштабные вихри, развивающиеся в Балтийском регионе, нетипичном для образования подобных циклонических циркуляций, существующих вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба, с горизонтальными размерами, не превышающими 1000 км. Наличие таких систем в атмосфере над Балтийским морем было обнаружено при анализе данных дистанционного зондирования, полученных различными приборами. Проанализированы спутниковые изображения и построены геофизические параметры в полярных циклонах.

Ключевые слова: дистанционные наблюдения атмосферы, полярный циклон, геофизические параметры атмосферы, Балтийское море, климат.

Mesoscale lows, which exist separately from synoptic frontal systems, are considered over the Baltic Sea, which is untypical for such cyclonic circulations with horizontal scale of not more than 1000 km. to develop in this region. The presence of such systems in the atmosphere over the Baltic Sea was detected by the analysis of the remote sensing images of different sensors. The fields of geophysical parameters inside polar cyclones are built and analyzed using various satellite instrument data.

Keywords: satellite remote sensing, polar lows, geophysical parameters of the atmosphere, the Baltic Sea, climate.

Ведение

Глобальное изменение климата, выявление климатических тенденций, поиск индикаторов изменений и прогнозирование климата в будущем представляют собой актуальную современную научную проблему. Последствия изменения климата могут привести к ряду негативных процессов, в частности, к ухудшению экологической ситуации в ряде регионов, а также к изменению основных параметров среды обитания животных.

Явления и процессы в системе океан-атмосфера, включая взаимосвязи океанических и атмосферных процессов, изучены далеко не полностью, несмотря на многолетние усилия ученых разных стран. Это в полной мере относится к таким явлениям, как полярные циклоны, которые ассоциируются с огромной разрушительной силой, с сильными осадками, мощной облачностью и штормовыми ветрами, и создают угрозу безопасности судов за счет обледенения и затруднения проведения производственных операций [8].

Полярные циклоны – это часть большого класса погодных мезомасштабных систем. Полярные циклоны называют и другими терминами: облачные за-

пятые, мезомасштабные циклоны, мезомасштабные вихри, арктические ураганы, арктические циклоны, холодные депрессии, нефронтальные мезомасштабные вихри [10]. На сегодняшний день термин «полярный циклон» обычно оставляют за наиболее интенсивными системами, у которых приповерхностный ветер превышает штормовое значение (15 м/с). Полярные циклоны представляют собой короткоживущие, но исключительно интенсивные мезомасштабные погодные системы, наблюдаемые над водной поверхностью. Размеры этих атмосферных вихрей - от 100 до 500–1000 км [13]. В ряде случаев прохождение циклонов сопровождается сильными осадками. Время жизни таких циклонов от нескольких часов до нескольких суток, что, в сочетании с небольшими размерами, затрудняет их обнаружение и изучение. Полярные циклоны развиваются от поверхности земли до очень больших высот, сохраняют свою циркуляцию не только в нижней, но и в верхней стратосфере. Особенно это проявляется в зимний период, когда развитие зимних полярных циклонов может достигать высот, значительно превышающих тропопаузы [3]. Полярные циклоны диссипируют достаточно быстро, когда приближаются к берегу или ледовой кромке.

Своевременное обнаружение полярных циклонов, изучение их характеристик, слежение за перемещением - прогноз положения и интенсивности представляют одну из важнейших задач морской метеорологии и изучения взаимодействия океана и атмосферы.

Полярные циклоны образуются в обоих полушариях, но антарктические мезомасштабные циклоны образуются реже и, чаще всего, не обладают такой энергией, как их северные аналоги, из-за существенно меньшей разницы температур на границе вода–воздух. Тем не менее, мощные полярные циклоны возникают и в Южном океане, хоть и не столь часто, как над морями Северного Ледовитого океана [11]. Полярные циклоны впервые были обнаружены над северо-восточной Атлантикой и морями Северо-Европейского бассейна, морями Бофорта и Чукотское. Также они встречаются над северо-восточной частью Тихого океана, морями Беринга, Охотское, Японское, Лабрадор, Баффина, над Гудзоновым заливом и проливом Дэйвиса. Самые интенсивные полярные циклоны образуются в зимнее время года в Норвежском, Баренцевом и Гренландском морях. Районы распространения полярных циклонов представлены на рис. 1.

Небольшой размер и короткое время жизни удаленность районов распространения от метеорологических станций и, как следствие, редкие синоптические наблюдения порождают ограничения в выявлении, отслеживании, изучении и прогнозировании развития полярных циклонов. И зарождаются мезомасштабные вихри неожиданно и только над водной поверхностью, и их жизненный цикл короче атмосферных циклонов синоптического масштаба. Более того, большинство численных моделей прогнозов погоды не обладают достаточным временным и пространственным разрешением для изучения мезомасштабных вихрей. Все эти факторы приводят к тому, что данные явления чаще всего не фиксируются на приземных картах погоды.



Рис. 1. Районы распространения полярных циклонов

Нефронтальные мезомасштабные вихри образуются в атмосфере не столь часто, как циклоны синоптического масштаба на фронтах, но заслуживают не меньшего внимания, поскольку с ними бывают связаны внезапные и резкие ухудшения погоды. Доказательством этого служат всевозможные примеры разрушительных последствий полярных циклонов над северными регионами. Например, в феврале 1983 г. полярный циклон при выходе на побережье США принес сильный снегопад (в Вашингтоне выпал снег, образовав слой высотой 100 см), при этом погибло 69 человек. Развитие таких циклонов характеризуется очень быстрым падением давления. Так, в одном из нефронтальных мезомасштабных вихрей в Атлантике в феврале 1989 г. давление за сутки упало на 35 гПа, с 973 до 938 гПа. В глубоком мезомасштабном циклоне, вышедшем на юг Англии в ночь с 15 на 16 октября 1987 г., давление за 12 ч упало на 14 гПа, с 972 до 958 гПа, причем скорость ветра достигала 45 м/с.

Поскольку, как было сказано выше, прямые измерения параметров океана и атмосферы в полярных циклонах малодоступны, а результаты моделирования плохо пригодны для использования из-за недостаточного пространственно-

временного разрешения, практически единственным инструментом для изучения этих явлений оказывается анализ спутниковых данных дистанционного зондирования в различных диапазонах электромагнитного спектра (мульти-спектральный подход) [6].

Применение мультиспектрального подхода для исследования эволюции и структуры полярных циклонов представляет собой обнаружение, отслеживание, определение траектории и расчет количественных характеристик полярных циклонов, который производится с использованием следующих данных спутникового дистанционного зондирования:

1. Пассивных микроволновых данных специального микроволнового сенсора – системы формирования изображения [Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I)] [со спутников серии программы спутниковой метеорологической обороны (Defense Meteorological Satellite Program (DMSP))] для получения общего содержания водяного пара в столбе атмосферы и общего содержания облачной жидко-капельной влаги в полярных циклонах с разрешением 25 км.

2. Пассивных микроволновых данных усовершенствованного микроволнового сканирующего радиометра – EOS [Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E)] (со спутника Aqua) для получения атмосферного водяного пара и жидко-капельной влаги в полярных циклонах с разрешением 12 км.

3. Данных спектрального усовершенствованного радиометра высокого разрешения [Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)] (со спутников серии [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)]) для визуального анализа облачности, сопровождающей развитие полярных циклонов.

4. Активных микроволновых данных низкого разрешения скаттерометра Seawinds (со спутника QuikSCAT) по полям приводного ветра.

5. Радиолокационных активных микроволновых данных усовершенствованного РЛС с синтезированной апертурой [Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)] (экологический спутник [Environmental satellite (Envisat)]), радиолокатора с синтезированной апертурой [Synthetic Aperture Radar (SAR)] (спутник RADARSAT) по полям приводного ветра высокого разрешения.

6. Видимых и ИК изображений спектрометрического радиометра [Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)] (со спутников Terra и Aqua) для анализа облачности.

В выполнении к спутниковым данным при мультиспектральном подходе по возможности используются контактные и модельные данные:

1. Данных прямых измерений (измерения профилей метеопараметров радиозондами, измерения приводного ветра океаническими буйями).

2. Синоптических карт.

3. Данных реанализа Национального центра по прогнозированию окружающей среды / Национального центра атмосферных исследований [National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)].

1. Климатические особенности региона Балтики

Исследования Балтийского моря делятся на протяжении многих лет. Расположенное в умеренном поясе вблизи Атлантического океана и глубоко вклиненное в сушу, Балтийское море характеризуется в основном морским климатом умеренных широт. Вместе с тем, морю свойственны и черты континентального климата. Балтийское море – внутриматериковое окраинное море, глубоко вдающееся в материк, оно расположено в северной Европе и принадлежит бассейну Атлантического океана, оказывающему влияние на климатические условия Балтики. Из-за большой вытянутости Балтийского моря как вдоль меридиана, так и вдоль параллели отдельные районы Балтийского моря размещаются в различных физико-географических и климатических зонах. Это, в свою очередь, оказывает влияние на океанологические и метеорологические процессы, происходящие в данном регионе и отдельных его районах. Связь Балтийского моря с Атлантическим океаном осуществляется через Северное море, проливы Скагеррак, Каттегат и Датские проливы (Большой и Малый Бельт, Эресунн (Зунд) и Фемарн-Бельт), однако эта связь затруднена из-за мелководности проливов. Вода в Балтийском море полностью обновляется каждые 30 лет [1]).

Погода Балтики во многом обусловлена воздействием Исландского минимума, Сибирского и Азовского антициклонов. Доминирующее воздействие определяют сезонные особенности. Осенью и зимой Балтийское море оказывается под влиянием Исландского минимума и Сибирского максимума, то есть во власти циклонов, которые распространяются осенью с запада на восток, а зимой на северо-восток. Для этого периода характерна пасмурная погода с сильными юго-западными и западными ветрами. Данные климатические условия могут спровоцировать формирование полярных циклонов. При усилении Полярного максимума холодные воздушные массы Арктики попадают на Балтийское море. В результате этого температура воздуха понижается до $-30-35$ °С. Но подобные похолодания случаются довольно редко и, как правило, являются непродолжительными [4]. Подобные условия, однако, очень благоприятны для развития мезомасштабных циклонических образований. В весенне-летний период Сибирский максимум теряет свою силу, и доминирующее воздействие на Балтийское море оказывает Азорский и, в меньшей степени, Полярный максимум. В это время на море наблюдается пониженное давление. Циклоны, приходящие на Балтику с Атлантического океана, не столь значительны, как зимой. Все это обуславливает неустойчивое направление ветров, которые имеют небольшие скорости. В весенний сезон большое влияние на погоду оказывают ветры северных направлений, они приносят холодный воздух. Летом преобладают ветры западного и северо-западного направлений. Эти ветры преимущественно слабые или умеренные. Благодаря их влиянию летом наблюдается прохладная и влажная погода. Очень редко на Балтику поступают теплые средиземноморские воздушные массы, приносящие жаркую погоду [2].

При ближайшем рассмотрении становится очевидным, что многие пробле-

мы Балтийского моря имеют непосредственное отношение к сохранению окружающей среды во всем Балтийском регионе. Одновременно, Балтика является также частью всей планеты, и на неё влияют изменения климата, которые, сами по себе, уже стали одной из крупнейших глобальных экологических проблем. Уже видны тревожные симптомы того, как потепление сказывается на гидрологических и метеорологических процессах в Балтийском регионе. Так, мы можем наблюдать такие атмосферные процессы, как полярные циклоны, которые никогда раньше в данном регионе не детектировались.

2. Примеры детектирования и изучения циклонов в Балтийском море по данным спутникового дистанционного зондирования

В настоящее время системы спутникового дистанционного зондирования позволяют обеспечивать измерения и непрерывный мониторинг полей различных геофизических параметров. Глобальные наблюдения за большими поверхностями могут осуществляться только при помощи спутниковых измерений. Развитие различных методов интерпретации данных дистанционного зондирования со спутников стимулируется все ухудшающейся экологической обстановкой в мире, необходимостью решения различных геологических, геофизических, метеорологических, гидрофизических и других задач.

Сама возможность идентификации и классификации объектов по данным дистанционного зондирования основывается на том, что объекты разных типов - горные породы, почвы, вода, растительность, облака и т.д. - по-разному отражают, поглощают и излучают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн. Таким образом, данные дистанционного зондирования позволяют получать постоянно обновляемую объективную информацию об объектах [12].

Основной источник количественной пространственной информации для изучения полярных циклонов – это спутниковые данные и поля геофизических параметров, восстановленных по данным различных спутниковых приборов. В 2008 г. в Международном центре по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена (Научный фонд «Нансен-Центр») начали исследовать полярные циклоны, используя мультиспектральный подход, в основе которого лежит анализ данных разных спутниковых сенсоров. В то время как спутниковые данные в видимом и инфракрасном диапазонах, данные скаттерометров и радиолокационные данные используются в основном как источник качественной информации, измерения пассивных микроволновых радиометров служат для получения количественных оценок атмосферных параметров для построения полей общего содержания атмосферного водяного пара и жидкокапельной влаги облаков в полярных циклонах. Данные микроволновых пассивных радиометров могут также эффективно использоваться для определения и отслеживания полярных циклонов [5].

Условия зарождения и развития полярных циклонов во многом определяются синоптической обстановкой над регионом. Как уже отмечалось, сезонные

особенности погоды на Балтике зависят от характера взаимодействия Исландского минимума, Сибирского и Азорского антициклонов. Над регионом часто проходят глубокие циклоны: осенью – с запада на восток, а зимой – на северо-восток. В весенне-летний сезон само море находится в полосе пониженного давления, по которой проходят менее глубокие, чем зимой, циклоны из Атлантического океана [9].

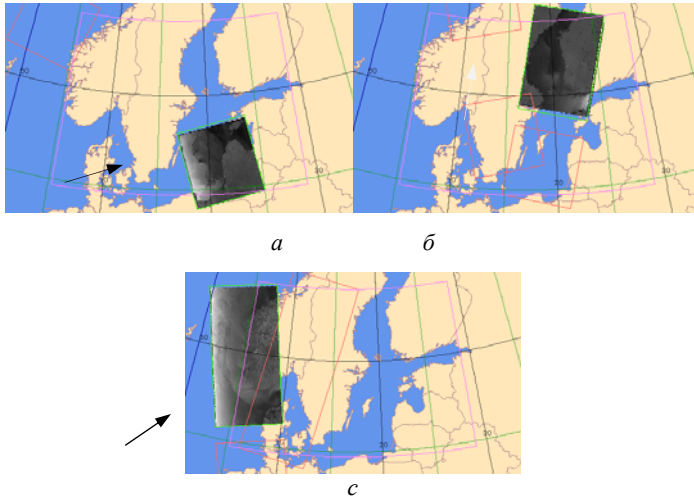


Рис. 2. Полярные циклоны в Балтийском море по данным прибора ASAR спутника ENVISAR.
a – в Балтийском море 21 декабря 2005, 20:11 Всемирного времени (ПЦ1);
б – в Ботническом заливе 2 января 2006, 09:06 Всемирного времени (ПЦ2);
в – в проливе Скагеррак 20 января 2006, 21:08 Всемирного времени (ПЦ3)

Пример трех полярных циклонов (ПЦ) в Балтийском море приведен на рис. 2 (ПЦ1 – *a*, ПЦ2 – *б*, ПЦ3 – *в*). Подчеркнем, что, по нашим данным, такие атмосферные процессы в данном регионе прежде никогда не детектировались. Анализ данных реанализа позволяет сделать вывод о том, что ни один из представленных ПЦ не проявляется в модельных полях давления. Полярные циклоны идентифицированы на изображениях прибора радара с синтезированной апертурой (РСА) спутника ENVISAT. Полярные циклоны анализировались, главным образом, по данным радиометров, по которым можно проследить не только траекторию перемещения и район зарождения, но и их центры, что невозможно сделать по снимкам в видимом диапазоне из-за сплошной облачности и наличия атмосферных вихрей большего масштаба. На данных изображениях, построенных по активным данным, полярные циклоны имеют две основные формы, одна из которых в виде запятой, другая спиралевидная. В сантиметровом диапазоне видны атмосферные системы с большим содержанием водяного пара, такие как полярные циклоны, грозовые облака, фронтальная облачность в системе циклона. Эти данные позволяют определить точное положение центра циклона, поле приводного ветра и скорость перемещения полярного циклона и уточнить раз-

меры полярного циклона. Высокое пространственное разрешение данных РСА позволяет диагностировать вихревые структуры таких размеров, которые оказываются за рамками возможностей пространственного разрешения любых других приборов. Большинство микро- и мезомасштабных проявлений атмосферных процессов на РСА изображениях поверхности океана коррелируют с облачными сигнатурами соответствующих явлений на снимках видимого и ИК диапазонов.

Данные космические изображения позволяют получить информацию о типах нестационарных вихревых движений, об их горизонтальных масштабах, времени жизни, направлении вращения и направлении перемещения в пространстве.

Часто атмосферные вихревые образования, таких как полярные циклоны, хорошо видны на снимках видимого диапазона. Однако полярные циклоны, сформированные под сплошной облачностью или в тылу циклона, практически не идентифицируются на изображениях видимого диапазона, как видно из рис. 3, на котором изображены полярные циклоны ПЦ1, ПЦ2 и ПЦ3.

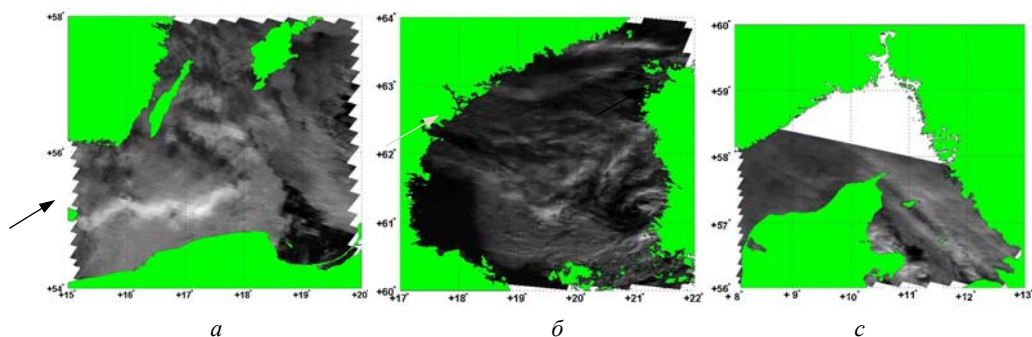


Рис. 3. Структура облачности полярных циклонов в Балтийском море по данным прибора MODIS спутников Terra и Aqua.
а – в Балтийском море (ПЦ1), 10:45; б – в Ботническом заливе (ПЦ2), 09:30;
с – в проливе Скагеррак (ПЦ3), 11:00

Анализ инфракрасных и видимых изображений приборов MODIS и AVHRR - это традиционный инструмент мониторинга полярных циклонов, так как данные видимого диапазона обеспечивают исследователей ценнейшей информацией о форме и структуре облачности, сопровождающей развитие мезомасштабных вихрей. Однако, как видно из приведенных примеров, облачность верхнего яруса может полностью скрыть проявления ПЦ.

Данные микроволновых скаттерметров независимо от облачности и времени суток позволяют анализировать поля приводного ветра и их вихревую структуру, сопровождающую развитие ПЦ. Для рассматриваемых примеров построены поля приводного ветра в Балтийском море, позволившие идентифицировать области высоких скоростей приводного ветра, характерные для развитых ПЦ (рис. 4).

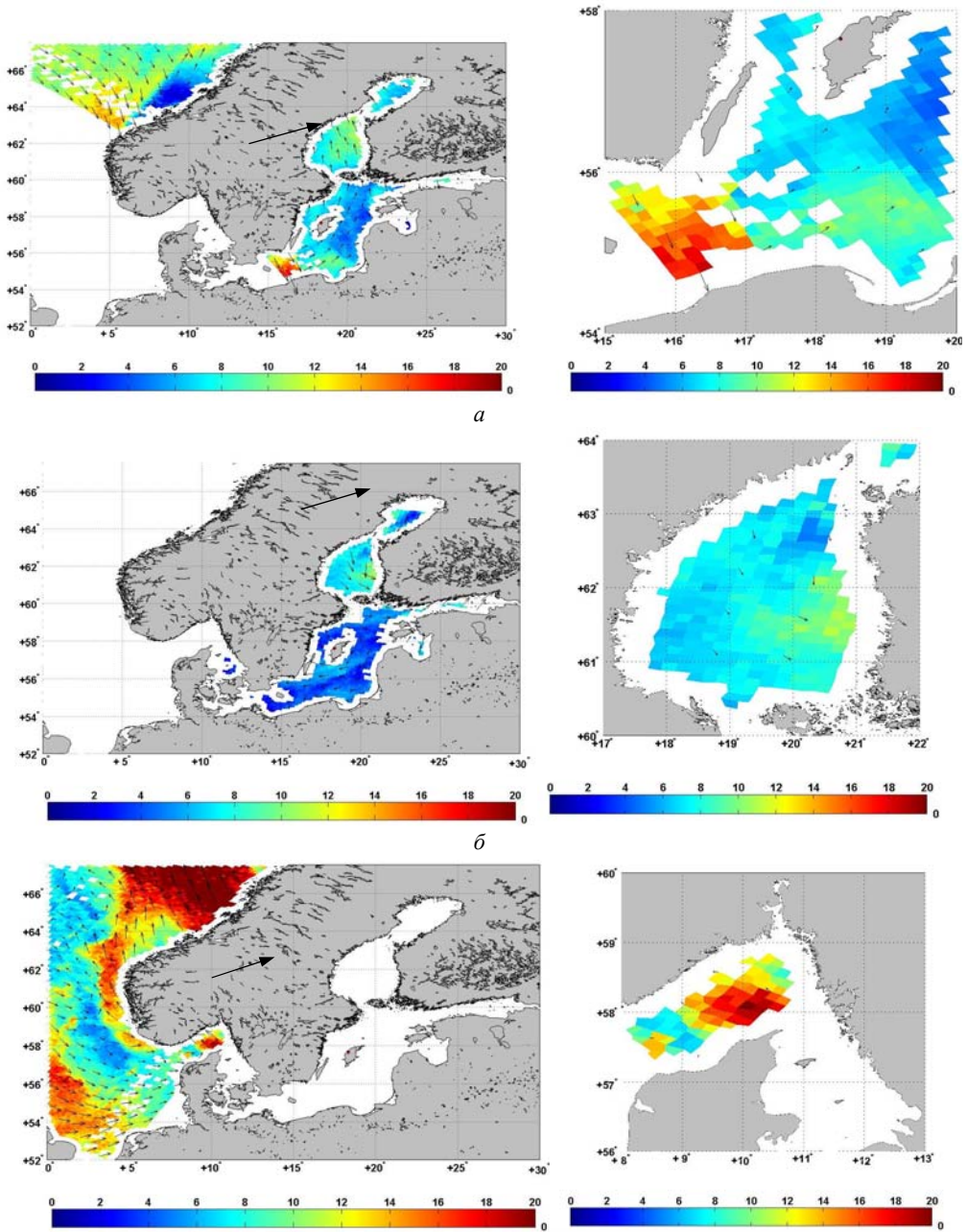
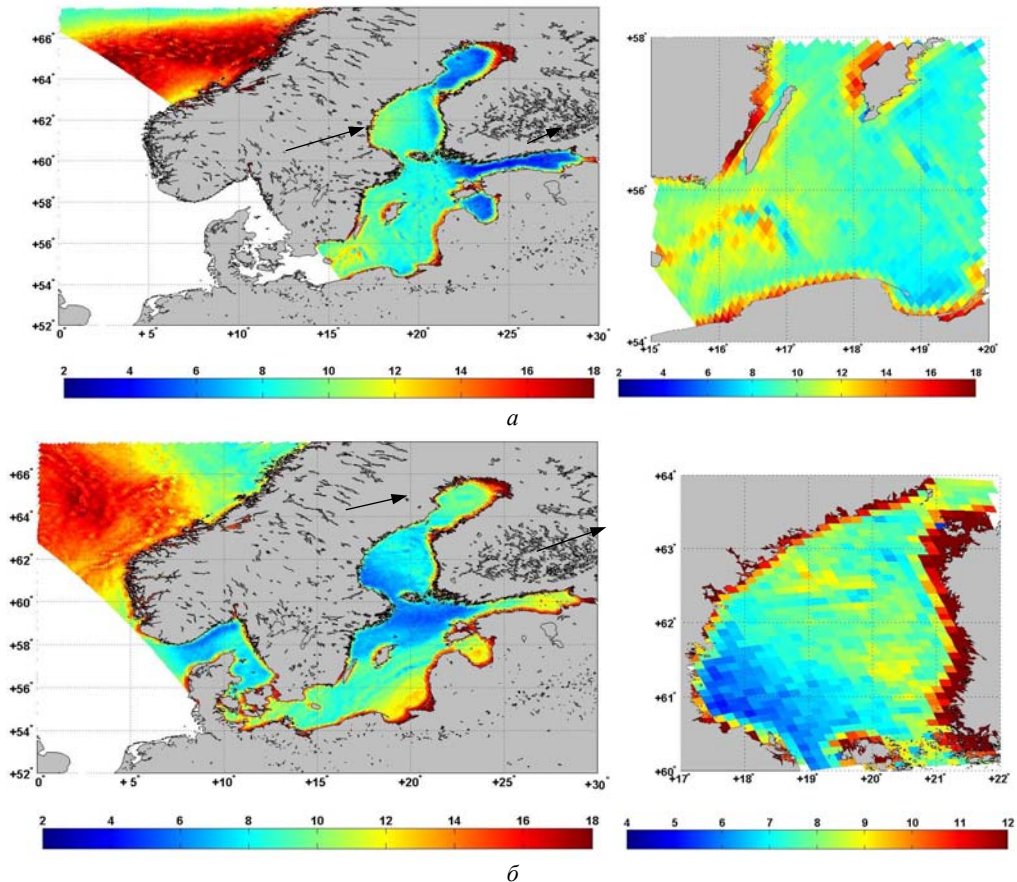


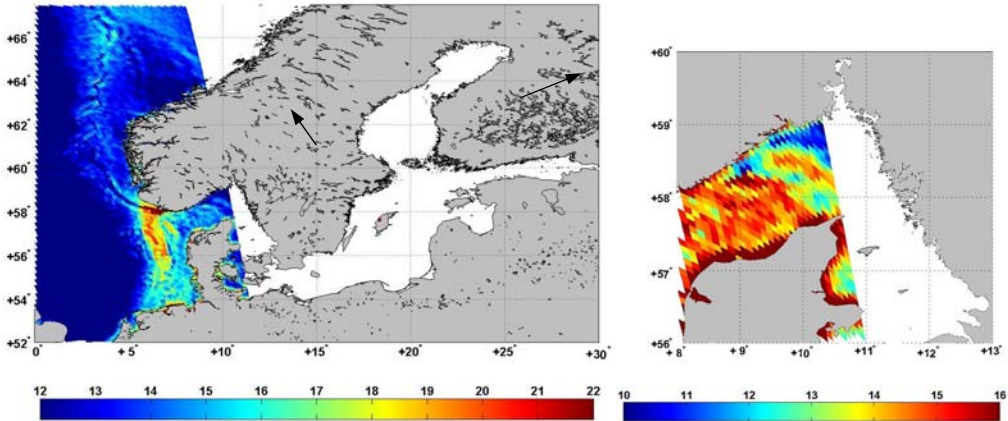
Рис. 4. Поля скоростей приводного ветра, m/s^2 в Балтийском море по данным скаттерометра SeaWinds спутника QuikSCAT. *a* – ПЦ1 в Балтийском море 21 декабря 2005, 03:06 Всемирного времени; *б* – ПЦ2 в Ботническом заливе 2 января 2006, 16:49 Всемирного времени; *с* – ПЦ3 в проливе Скагеррак 20 января 2006, 19:20 Всемирного времени

На рис. 4, *а* и *с* ПЦ ярко выражены, поскольку скорости ветра достигают 19 м/с. На рис. 4, *б* заметно ослабление скоростей ветра, свидетельствующее о стадии диссипации полярного циклона.

В отличие от данных САР, обладающих высоким пространственным разрешением, скаттерометрические поля приводного ветра не позволяют исследовать детальную структуру океанических проявлений ПЦ. Зато они выгодно отличаются от САР регулярностью (в полярных районах 2–6 раз в сутки в зависимости от широты) и доступностью.

Измерения пассивного микроволнового радиометра AMSR-E являются наиболее эффективными из всех рассмотренных приборов, так как, во-первых, возможность их интерпретации не зависит от освещенности поверхности и наличия облачности, а во-вторых, они обеспечивают исследователей количественной информацией о различных параметрах атмосферы и океана. На рис. 5 приведены поля водяного пара атмосферы, восстановленные по данным AMSR-E, имеют разрешение 10.





с

Рис. 5. Поля общего содержания водяного пара в атмосфере ($\text{кг}/\text{м}^2$) в Балтийском море, восстановленные по данным прибора AMSR-E спутника Aqua. *a* – в Балтийском море 21 декабря 2005, 10:55 Всемирного времени; *b* – в Ботническом заливе 2 января 2006, 11:20 Всемирного времени; *c* – в проливе Скагеррак 20 января 2006, 12:46 Всемирного времени

На рис. 5 в полях водяного пара четко идентифицируются полярные циклоны. Содержание водяного пара в столбе атмосферы было восстановлено при помощи алгоритма, основанного на применении нейронных сетей. Данный алгоритм обладает высокой точностью и расширенным диапазоном применения, что дает возможность его успешного использования для изучения полярных циклонов.

Заключение

Проведенные при помощи мультиспектрального подхода исследования полярных циклонов в Балтийском море подтвердили высокую эффективность подхода при изучении данных атмосферных явлений. Пассивные микроволновые пассивные данные по сравнению с другими спутниковыми данными обладают рядом преимуществ, заключающихся в регулярности, высоком временном разрешении, независимости от освещенности и облачности и в возможности получения количественной информации путем восстановления полей геофизических параметров. Ко всем радиометрическим данным применены специальные алгоритмы оценки параметров атмосферы и океана и построены соответствующие поля, позволяющие проводить количественный анализ изменений, сопровождающих развитие полярных циклонов.

Распространение неподвижных и плавучих льдов в Балтийском море зависит от суровости зимы, но с изменениями климатических условий на сегодняшний момент в течение зимы лед может исчезать совсем, а затем появляться снова, что свойственно морю с неустойчивым ледяным покровом. Наличие подобных климатических условий оказывается благоприятным для формирования та-

ких уникальных мезомасштабных атмосферных процессов, как полярные циклоны. Наиболее интенсивные полярные циклоны наблюдаются в зимний период.

Для решения проблем комплексного изучения полярных циклонов спутниковые данные дистанционного зондирования являются единственным источником информации, позволяющим вести картографирование поверхности быстрее и экономичнее по сравнению с авиационными и наземными измерениями. Еще несколько лет назад изображения Земли из космоса использовались лишь узким кругом специалистов. Сегодня спутниковые снимки становятся повседневным источником объективной и актуальной информации для решения различных и достаточно сложных задач науки [6]).

Исследование полярных циклонов, их своевременное обнаружение, изучение качественных и количественных характеристик, отслеживание движения и прогнозирование представляют собой одну из важнейших задач современной науки, перспектива решения которой видится, как показано на примере Балтийского моря, в использовании спутниковых данных различных приборов.

Литература

1. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. – М.: изд. МГУ, 1982. – 192 с.
2. *Леонов А.К.* Региональная океанография. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 764 с.
3. *Степаненко В.М., Вельтищев Н.Ф.* Мезометеорологические процессы. – М.: изд. МГУ, 2007. – 127 с.
4. *Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А.* Океанология. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 164 с.
5. *Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., and Mitnik M. L.* 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.
6. *Businger S.* The synoptic climatology of polar low outbreaks, *Tellus* 37A, 419–432, 1985.
7. *Fu G., Niino H., Kimura R., Kato T.* A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part I: Observational analysis // *Monthly Weather Review*, 2004, v. 132, pp. 1537-1551.
8. *Forbes G.S., Lottes W.D.* Classification of mesoscale vortices in polar air streams and the influence of the large-scale environment on their evolutions. *Tellus* 37A, 132–155, 1985.
9. *Harley D.G.* Frontal contour analysis of a “polar” low, *Meteorol. Mag.* 89, 141–147, 1960.
10. *Hawkins H.F., Imbembo S.M.* The structure of a small intense hurricane-Inez 1966, *Mon. Wea. Rev.* 104, 418–442, 1976.
11. *Harrold P.W., Browning K.A.* The polar low as a baroclinic disturbance, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 95, 710–723, 1969.
12. *Mitnik L.M.* Mesoscale atmospheric vortices in the Okhotsk and Bering Seas: Results of satellite multisensor study, In: *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security)* by Jacques C.J. Nihoul and A.G. Kostianoy (Editors), Springer, pp. 37-56, 2009.
13. *Rasmussen E., Turner J.* *Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 612p, 2003.

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