

На правах рукописи
УДК 551.465.7: 551.589

Смирнова Юлия Ефимовна

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ В МОРЯХ СЕВЕРО-
ЕВРОПЕЙСКОГО БАССЕЙНА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ) и в научном фонде «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Кудрявцев Владимир Николаевич

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук

Бобылев Леонид Петрович

Официальные оппоненты:

доктор географических наук

Белоненко Татьяна Васильевна

доктор физико-математических наук,
профессор

Мелентьев Владимир Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «АНИИ»)

Защита состоится «18» февраля 2016 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.

Электронная почта: jsmirnova@rshu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Гидрометеорологического Университета или на сайте:

<http://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук,
профессор



Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Полярные циклоны (ПЦ) представляют собой кратковременные, но исключительно интенсивные атмосферные мезомасштабные вихри, образующиеся над свободной ото льда морской поверхностью к полюсу от основной бароклининой зоны (полярного фронта или другой обширной бароклининой зоны). Характерный пространственный размер этих вихревых образований составляет менее 1000 км, а время жизни, как правило, не превышает 1-2 дня, что в совокупности зачастую не позволяет обнаруживать ПЦ на синоптических картах. Скорость приповерхностного ветра, развиваемая в ПЦ, превышает 15 м/с, что является главной особенностью, позволяющей выделить их в отдельный подкласс мезомасштабных циклонов.

Актуальность исследований ПЦ, в первую очередь, обусловлена их большой разрушительной силой и создаваемой ими угрозой безопасности судоходства в высоких широтах в целом и по Северному морскому пути в частности. Специфическую опасность для морской деятельности представляет обледенение, вероятность и интенсивность которого возрастает за счет штормового ветра и высоких волн, сопутствующих ПЦ. Наиболее интенсивные ПЦ могут предоставлять угрозу для платформ по добыче углеводородов на Арктическом шельфе. Кроме того, изучение ПЦ приобретает актуальность и в связи с резким уменьшением в последние годы площади Северного Ледовитого океана, покрытой многолетними морскими льдами, что приводит к появлению новых районов открытой воды, являющихся потенциально пригодными для возникновения и развития ПЦ в акваториях морей российского сектора Арктики.

Кроме того, ПЦ в Арктическом регионе оказывают влияние на крупномасштабную циркуляцию океана. За счет высоких скоростей приводного ветра и, как следствие, интенсивного взаимодействия между морем и атмосферой тепловые потери поверхности моря могут превышать 1000 Вт/м^2 (Condrón and Renfrew, 2013). Этого достаточно для того, чтобы увеличить глубину, частоту и площадь глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, что, в свою очередь, может повлиять на термохалинную океаническую циркуляцию (Marshall and Schott, 1999).

Однако, несмотря на большое значение ПЦ как для производственной деятельности в Арктике, так и для климатической системы Земли, их изученность на данный момент явно недостаточна. Это обусловлено как трудностями их обнаружения на приземных картах погоды, моделирования и прогнозирования, так и недостатком данных наблюдений. В районах основного распространения ПЦ регулярные гидрометеорологические наблюдения практически отсутствуют, поэтому основным источником информации о ПЦ являются спутниковые наблюдения.

Степень разработанности темы

Начиная с появления первых искусственных спутников Земли в 60-х годах прошлого столетия и по настоящее время, изучение ПЦ, в основном, базируется на визуальном анализе спутниковых изображений облачного покрова, полученных инфракрасными (ИК)

радиометрами (Wilhelmsen, 1985; Blechschmidt, 2008).

Однако, статистика ПЦ, полученная при анализе снимков в ИК диапазоне, может оказаться заниженной, поскольку эти данные содержат информацию лишь о верхнем слое облаков. И, несмотря на относительно высокое пространственное разрешение (например, 1 км для ИК измерений Advanced Very High Resolution Radiometer; AVHRR), часть ПЦ оказывается скрыта верхними облаками и не идентифицируется в полях облачности. Пространственно-временные распределения ПЦ в Северо-Европейском бассейне, приведенные в ряде работ (Wilhelmsen, 1985; Blechschmidt, 2008; Zahn and von Storch, 2008; Noer et al., 2011), основаны либо на визуальном анализе спутниковых ИК изображений или приземных карт погоды, либо на анализе данных глобальных атмосферных реанализов и результатов численного моделирования. Данные реанализов также не позволяют обнаруживать значительное число ПЦ, в том числе при использовании их в качестве входных параметров для численных моделей (Zappa et al., 2014; Laffineur et al., 2014). Таким образом, существующие оценки частоты образования ПЦ и основных районов их образования в регионе исследования являются неточными.

Существенно меньшее количество исследований ПЦ основано на использовании данных пассивных микроволновых радиометров, по которым возможно восстановление интегральных параметров атмосферы, а не только характеристик верхней границы облаков. Отдельные работы, описывающие некоторые случаи обнаружения ПЦ с использованием микроволновых радиометрических данных, появились лишь в последние годы. Систематизация же ПЦ по этим данным, позволяющим более точно оценить частоту зарождения ПЦ в высоких широтах, не осуществлена до сих пор.

Цели работы

Целью данной работы является анализ пространственно-временного распределения ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна (Баренцево, Норвежское и Гренландское моря), а также определение их индивидуальных характеристик (максимальное и минимальное значение влагозапаса атмосферы, диаметр, время жизни, максимальная скорость ветра, пройденное расстояние и скорость передвижения) за период 1995–2009 гг. для выявления общих закономерностей и тенденций, связанных с этим явлением, по данным измерений спутниковых пассивных микроволновых радиометров, ранее не использовавшихся для подобных целей.

Задачи исследования

Для достижения поставленных целей в ходе работы решались следующие задачи:

- анализ существующих исследований, посвященных ПЦ, в целях выбора оптимального метода идентификации ПЦ, позволяющего наиболее точное обнаружение ПЦ в исследуемом регионе;
- создание базы данных измерений спутниковых микроволновых радиометров Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) за 1995–2009 гг. над морями Северо-Европейского бассейна и применение алгоритма восстановления геофизических параметров атмосферы ко всему объему данных;

- визуальный анализ полученных полей влагозапаса атмосферы и скорости приводного ветра (94976 файла). Идентификация в полях вихревых образований, потенциально являющихся ПЦ, т.е. соответствующих критериям: диаметр и время жизни менее 1000 км и 48 ч, соответственно; применение критерия скорости приводного ветра (более 15 м/с) для определения принадлежности обнаруженных вихревых образований к классу ПЦ;
- привлечение дополнительных спутниковых данных (скаттерометрических, инфракрасных, радиолокационных) для всех обнаруженных случаев с целью детального изучения проявлений ПЦ в полях облачности и скорости ветра;
- создание климатологии ПЦ, основанной на данных измерений спутниковых пассивных микроволновых радиометров;
- выявление пространственно-временных особенностей частоты образования ПЦ, а также расчет и анализ основных характеристик ПЦ;
- статистический анализ связи между частотой образования ПЦ и площадью ледяного покрова в исследуемом регионе.

Материалы и методы исследования

С целью решения поставленных задач использовались следующие материалы:

- радиояркие температуры, измеренные спутниковым микроволновым радиометром SSM/I;
- поля скорости приводного ветра, восстановленные по данным спутникового микроволнового радиометра SSM/I (<http://www.remss.com>);
- поля скорости приводного ветра, восстановленные по данным спутникового скаттерометра QuikSCAT SeaWinds (<http://poet.jpl.nasa.gov>);
- снимки радара с синтезированной апертурой и восстановленные по ним поля скорости приводного ветра;
- инфракрасные снимки радиометра AVHRR (<http://www.sat.dundee.ac.uk>).

Методологическую основу выполненных работ составили методы математического, статистического и синоптического анализа. Поля геофизических параметров были восстановлены по методике, описанной в работе Bobylev et al. (2010). Вихревые образования, потенциально являющиеся ПЦ, были обнаружены с использованием метода визуального анализа полей влагозапаса атмосферы и синоптического анализа. Для анализа достоверности полученных коэффициентов корреляции использовались методы статистической проверки гипотез (t-критерий Стьюдента). Расчет геофизических параметров и их визуализация, а также расчет индивидуальных характеристик ПЦ осуществлялись с помощью программного пакета «Matlab».

Научная новизна

- Впервые для последовательного обнаружения ПЦ за достаточно длинный временной период применен метод, основанный на измерениях спутниковых микроволновых радиометров;
- Впервые продемонстрировано, что использование измерений спутниковых

микроволновых радиометров ведет к приблизительно 5-процентному увеличению числа обнаруживаемых ПЦ по сравнению с использованием исключительно инфракрасных спутниковых снимков;

- Впервые создана климатология ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна за 14 сезонов с сентября по апрель в период 1995-2009 гг. с применением метода, основанного на обнаружении ПЦ в полях влагозапаса атмосферы, восстановленных по данным спутниковых микроволновых радиометрических измерений, не использовавшихся ранее для подобных задач;
- Уточнены оценки частоты образования ПЦ (количество циклонов в год и в месяц). Показано, что они значительно превышают оценки, полученные в предыдущих работах. Кроме того, обнаружена тенденция (2.6%) к увеличению количества ПЦ за исследуемый период;
- Впервые установлено, что наибольшее количество ПЦ в рассматриваемом районе образуется в марте, а не в январе, как считалось ранее, исходя из предыдущих работ;
- Уточнено пространственное распределение ПЦ в морях Северо-Европейского бассейна, на основании которого были получены результаты, существенно отличные от предыдущих работ, основанных на ИК данных и результатах моделирования, и позволившие произвести оценку степени угрозы, которой могут подвергаться те или иные локальные регионы исследуемой области. В частности, показано, что число случаев зарождения ПЦ в Баренцевом море значительно выше, чем считалось ранее;
- На основании существенно большего объема выборки уточнены среднесезонные (за период 1995-2009 гг.) оценки характеристик ПЦ в рассматриваемом регионе, а именно, средние диаметр, время жизни, скорость перемещения, пройденное расстояние, максимальная скорость ветра, максимальные и минимальные значения влагозапаса атмосферы в ПЦ, а также распределения количества ПЦ по этим характеристикам;
- Впервые выявлена высокая статистическая взаимосвязь между площадью ледяного покрова в Баренцевом море и частотой образования ПЦ.

Теоретическая и практическая значимость

Составленная в ходе работы база ПЦ в Северо-Европейском бассейне предоставляет возможность проанализировать и уменьшить риски эксплуатации нефтегазовых сооружений, оценить безопасность мореплавания, в том числе по Северному морскому пути, выявить наиболее опасные для рыбного промысла и прибрежного строительства районы из рассматриваемого региона.

Апробированный в данной работе метод обнаружения и изучения ПЦ может быть применен для изучения индивидуальных характеристик и пространственно-временного распределения ПЦ в любом другом регионе, в частности, в морях восточного сектора Арктики.

Анализ пространственно-временного распределения и индивидуальных характеристик ПЦ за достаточно длинный временной ряд (14 сезонов) позволил углубить фундаментальные

знания о ПЦ. Кроме того, в ходе данной работы, на примере Баренцева моря, впервые показано, что уменьшение площади Северного Ледовитого океана, покрытой многолетними морскими льдами, ведет к образованию большего количества ПЦ.

Обнаруженные в ходе работы ПЦ представлены на портале Arctic Syntool (<http://arctic.solab.rshu.ru/>) в Лаборатории Спутниковой Океанографии РГГМУ.

Полученные база данных и полуавтоматические алгоритмы по расчету и визуализации основных характеристик ПЦ впоследствии были запатентованы.

Положения, выносимые на защиту

- Наиболее полная база обнаруженных ПЦ, показывающая, что среднее за сезон число генерируемых ПЦ в Северо-Европейском бассейне, -45.5, существенно превышает полученные ранее оценки;
- Закономерности пространственного и сезонного распределения ПЦ, указывающие основные районы их распространения и интенсификацию генерации ПЦ в марте;
- Оценки средних многолетних значений и распределения следующих характеристик ПЦ: диаметр, время жизни, скорость передвижения, пройденное расстояние, максимальная скорость ветра, максимальные и минимальные значения влагозапаса атмосферы в ПЦ;
- Оценки взаимосвязи частоты образования ПЦ с площадью ледяного покрова.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается детальным анализом обнаруженных ПЦ с привлечением всех доступных данных. Дополнительный анализ полей облачности и влагозапаса атмосферы за три дня до случая ПЦ и три дня после позволил исключить из рассмотрения атмосферные образования, не являющиеся ПЦ (например, диссипирующие синоптические системы). Основные результаты и выводы, полученные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, представлялись на международных и российских конференциях, симпозиумах и семинарах.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Исследование ПЦ в морях Северо-Европейского бассейна является частной задачей океанологии, решаемой с целью изучения процессов и циклов переноса энергии и вещества с участием океана, а также выработки практических рекомендаций в области экономического использования пространств и ресурсов Мирового океана. Результаты работы соответствуют паспорту специальности «25.00.28 Океанология» по следующим пунктам:

9. Взаимодействие в системе литосфера – гидросфера – атмосфера;
14. Основы хозяйственной деятельности в Мировом океане, в том числе в областях воздействия опасных океанологических процессов;
16. Методы проведения судовых, береговых и дистанционных океанологических наблюдений, их обработки и анализа.

Апробация работы и публикации

Результаты, полученные в данной работе, докладывались и обсуждались на семинарах научного фонда «Нансен-Центр», Лаборатории спутниковой океанографии, а также работа

была представлена на российских и международных конференциях:

1. International conference «Fluxes and structures in fluids: physics of geospheres» (Москва, Россия, 2009);
2. International Conference for the 50'th anniversary of the IOC UNESCO «50 years of Education and Awareness raising for shaping the Future of the Oceans and Coasts» (Санкт-Петербург, Россия, 2010);
3. International Scientific Conference «Water, Ecology and Hydrology security» under the auspices of UNESCO (Санкт-Петербург, Россия, 2010);
4. 8th Baltic Sea Science Congress (Санкт-Петербург, Россия, 2011);
5. Summer school «Impact of climate change on resources, maritime transport and geopolitics in the Arctic and the Svalbard area» (Шпицберген, Норвегия, 2011);
6. Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса» (Москва, Россия, 2011)
7. Arctic Frontiers 2012 conference «Energies of the High North» (Тромсё, Норвегия, 2012);
8. Arctic Frontiers 2013 conference «Geopolitics and Marine Production in a Changing Arctic» (Тромсё, Норвегия, 2013);
9. Конференции молодых специалистов по проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (Обнинск, Россия, 2013);
10. International conference «Fluxes and structures in fluids: physics of geospheres» (Санкт-Петербург, Россия, 2013);
11. 19th Satellite Meteorology, Oceanography, and Climatology Conference, American Meteorological society (AMS) (Вена, Австрия, 2013);
12. 20th EUMETSAT Meteorological Satellite Conference (Женева, Швейцария, 2014)
13. Международный научный семинар «Remote sensing of dangerous events in the ocean-atmosphere system» (Санкт-Петербург, Россия, 2015).

Публикации

Результаты работы приведены в 4 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии и в 3 патентах.

Личный вклад автора

Автор работы принимал участие на всех этапах исследования от постановки задачи до анализа результатов, разрабатывал программы, реализующие методы расчета характеристик ПЦ, производил обработку всего массива спутниковых данных, в том числе визуальный анализ 94976 изображений восстановленных полей влагозапаса атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 113 страницах текста, включая 48 рисунков, 1 таблицу и 3 приложения. Библиография диссертационной работы составляет 72

наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается обзор литературы по ПЦ. Описываются их основные характеристики, рассматриваются различные методы исследования ПЦ и существующие климатологические работы по ПЦ.

В разделе 1.1 вводится понятие мезомасштабных и полярных циклонов. Мезомасштабными циклонами (МЦ) называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами, не превышающими 1000 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба.

МЦ, образующиеся зимой в холодных воздушных массах над более теплыми акваториями океанов в высоких широтах к полюсу от основной бароклинной зоны, представляющие собой кратковременные (время жизни, как правило, не превышает 1-2 дней) и исключительно интенсивные погодные явления со скоростями ветра, превышающими 15 м/с, получили название ПЦ (Rasmussen and Turner, 2003).

В разделе 1.2 описываются основные особенности формирования ПЦ. Обобщение исследований синоптической ситуации, сопровождающей зарождение ПЦ, позволяет провести условную классификацию движущих механизмов, ответственных за их возникновение:

1. Потоки активного и скрытого тепла;
2. Бароклинная неустойчивость:
 - поверхностные потоки могут стать параллельны краю пакового льда, создавая, таким образом, условия для образования резких бароклинных зон;
 - конвергенция в поле скоростей ветра также может привести к образованию зон повышенной бароклинности. В этом случае полярный циклон может образоваться на значительном расстоянии от ледовой кромки;
3. Баротропная неустойчивость;
4. Холодные высотные ложбины и депрессии;
5. Условная неустойчивость второго рода;
6. Неустойчивость взаимодействия океана и атмосферы.

В разделе 1.3 описываются различные типы ПЦ.

Стремление обобщить и классифицировать ПЦ всегда базировалась как на их проявлениях на спутниковых изображениях, так и на механизмах их формирования, обусловленных той или иной синоптической ситуацией.

В работе (Rasmussen and Turner, 2003) предложена расширенная классификация «спектра полярных циклонов», основанная на четко определенной синоптической картине

циклона и – частично – на представлении о механизме их формирования (таблица 1).

Таблица 1 - Классификация полярных циклонов, проведенная на основании анализа спутниковых и синоптических данных.

Группа	Название
1	Системы реверсивной кривизны
2	Барические ложбины
3	Фронты в погранслое
4	Холодные депрессии (включая вихревые системы)
5	Облачные запяты
6	Бароклинные волны – системы прямых сдвигов
7	Орографические полярные циклоны

В разделе 1.4 описывается влияние ПЦ на морскую деятельность в Арктическом регионе. Штормовой ветер усиливает волнение моря и обрушение волн, что при низких температурах воздуха может привести к быстрому обледенению судов. Эти особенности представляют серьезную опасность для находящихся в море судов и хозяйственной деятельности прибрежных районов. Кроме того, безопасность транспортного морского судоходства, нефтяных платформ и все возрастающего прибрежного строительства в Арктическом регионе также напрямую связана с этими штормовыми образованиями.

В разделе 1.5 описывается влияние ПЦ на океаническую циркуляцию. Интенсивные ПЦ, характеризующиеся высокими скоростями приводного ветра, приводят к тепловым потерям поверхностных вод океана более 1000 Вт/м^2 , что достаточно, чтобы значительно усилить глубокую конвекцию (Moore et al., 1996).

Подтверждение механизма влияния ПЦ на термохалинную циркуляцию океана получено в работе (Condron and Renfrew, 2012), в которой с помощью численного моделирования показано, что прохождение ПЦ приводит к увеличению рассчитанных глубины, частоты и площади глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, что, в свою очередь, дает увеличение направленного к северу переноса тепла и направленного к югу транспорта глубинных вод через Датский пролив. Таким образом, ПЦ оказывают влияние на крупномасштабную циркуляцию океана.

В разделе 1.6 рассматриваются современные методы обнаружения и исследования ПЦ.

В разделе 1.6.1 приводятся примеры моделирования ПЦ. Лишь относительно недавно были разработаны модели, способные воспроизвести развитие ПЦ. Численные модели атмосферы, предсказывающие на основании анализа начальных условий ее будущее состояние, являются одним из инструментов в изучении ПЦ, позволяющим прогнозировать их эволюцию. Отдельные случаи ПЦ были промоделированы апостериори, не в оперативном режиме, при помощи моделей, специально разработанных для представления этих конкретных погодных ситуаций. Однако небольшой размер ПЦ, 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.

В разделе 1.6.2 рассматриваются работы, посвященные анализу полей облачности по данным радиометров и спектрорадиометров, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Также рассматриваются закономерности проявления стадий ПЦ (зарождения и развития, развитого состояния и диссипации) на снимках ИК диапазона. Главной отличительной чертой анализа полей облачности по спутниковым данным является субъективность, поскольку сами методы представляют из себя визуальный анализ изображений облачности в видимом и инфракрасном диапазонах.

В разделе 1.6.3 рассматриваются спутниковые данные, позволяющие получить информацию о скорости приводного ветра. Поскольку высокое значение максимальной скорости приводного ветра, развивающейся в циклоне, является неперенным атрибутом и отличительной особенностью ПЦ, анализ данных, предоставляющих информацию о скорости приводного ветра, представляется необходимым элементом в распознавании ПЦ и выделении их из группы менее интенсивных мезовихрей.

В разделе 1.6.4 рассматриваются данные спутниковых микроволновых радиометров для изучения ПЦ. Регулярность (в полярных районах временное разрешение составляет несколько раз в сутки), независимость от времени суток и погодных условий делает данные микроволновых радиометров уникальным и ценным источником информации о ПЦ, а наличие точных методов определения различных геофизических параметров, позволяет получать не только качественную картину зарождения, движения и диссипации ПЦ, но и количественно оценивать их характеристики.

По данным измерений микроволновых радиометров возможно восстановление интегрального содержания водяного пара (влагозапаса) в атмосфере, в полях которого проявляются ПЦ. За счет этого появляется возможность обнаружения ПЦ, скрытых верхним слоем облаков и не детектируемых с помощью инструментов, работающих в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра, регистрирующим излучение верхнего слоя облаков. Одним из основных преимуществ использования микроволновых данных является также возможность одновременного получения полей скорости приводного ветра, необходимых для оценки интенсивности мезомасштабных циклонов и принятия решения о принадлежности к классу ПЦ.

В разделе 1.7 описываются основные районы распространения ПЦ и особенности региона исследования (Северо-Европейский бассейн). Ледовитость региону исследования свойственна только сезонная, в южной и северо-восточной частях (Норвежское и Баренцево моря) сильно выражено влияние теплого Северо-Атлантического течения, а в северо-западной части (Гренландское море) – устремленный к югу отток холодных вод. Таким образом, в течение зимнего периода в данном регионе наблюдаются большие площади свободные от морского льда, над которыми и происходит формирование ПЦ, что делает регион наиболее благоприятным для их зарождения.

В разделе 1.8 описываются ранее выполненные климатологические работы по ПЦ. Исследования ПЦ, особенностей их формирования и эволюции, продолжаются уже более

полувека. Ряд работ, связанных с изучением ПЦ, носит климатологический характер. Эти работы базируются преимущественно на визуальном анализе спутниковых снимков в инфракрасном диапазоне и результатов модельных расчетов (в том числе, данных глобальных атмосферных реанализов).

Однако, воспроизведение всех случаев ПЦ невозможно даже с помощью моделей, обладающих разрешением свыше 12 км (Zappa et al., 2014), а при использовании инфракрасных снимков часть ПЦ может быть скрыта верхней облачностью.

Во второй главе описывается метод обнаружения полярных циклонов, основанный на применении данных спутникового пассивного микроволнового зондирования.

В разделе 2.1 описываются методические основы спутникового пассивного микроволнового зондирования системы океан-атмосфера и их особенности применительно к полярным циклонам.

Спутниковые микроволновые радиометры применяются для получения сведений о характеристиках как земной поверхности, так и атмосферы. Спутниковые пассивные микроволновые измерения обладают преимуществами по сравнению с другими методами дистанционного зондирования, поскольку позволяют получать количественную информацию о параметрах атмосферы и океана независимо от времени суток в условиях облачности.

Раздел 2.2. посвящен методу обнаружения полярных циклонов по данным спутниковых микроволновых радиометров и мультисенсорному анализу обнаруженных полярных циклонов.

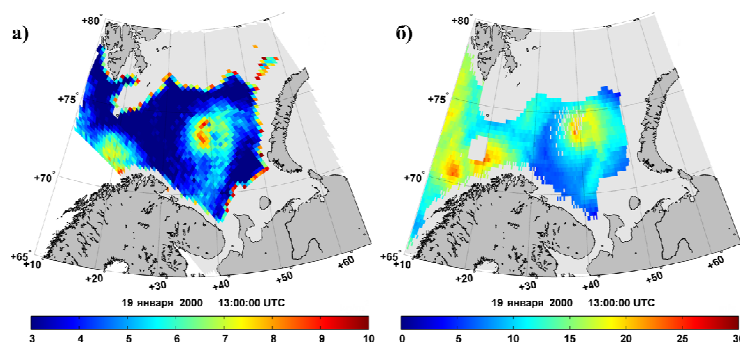
В разделе 2.2.1 описывается метод идентификации полярных циклонов в восстановленных полях влагозапаса атмосферы.

В целях обнаружения ПЦ и дальнейшего получения и анализа их индивидуальных характеристик за весь период исследования (с 1995 по 2009 гг.) был применен метод, включающий следующие этапы:

- 1) Получение радиояркостных температур по данным спутникового микроволнового радиометра SSM/I;
- 2) Применение алгоритма восстановления интегральных значений влагозапаса атмосферы ко всему объему полученных данных;
- 3) Получение полей скорости приводного ветра, восстановленных по данным спутникового микроволнового радиометра SSM/I (<http://www.remss.com/>);
- 4) Визуальный анализ полей влагозапаса атмосферы с целью обнаружения вихревых образований, потенциально являющихся полярными циклонами (пространственный размер не более 1000 км, время жизни не более 48 ч.), над Северо-Европейским бассейном за исследуемый период (за исключением летних месяцев: с мая по август). Проанализировано 94 976 изображений;
- 5) Применение критерия скорости приводного ветра (более 15 м/с) в обнаруженных вихревых образованиях для подтверждения вихревого образования как ПЦ или исключения его из дальнейшего анализа.

На рисунке 1 представлен пример обнаружения мезоциклона в восстановленных

полях влагозапаса атмосферы и подтверждение его принадлежности к классу ПЦ по критерию максимальной скорости приводного ветра, развиваемой в циклоне.



а) поле влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным радиометра SSM/I;

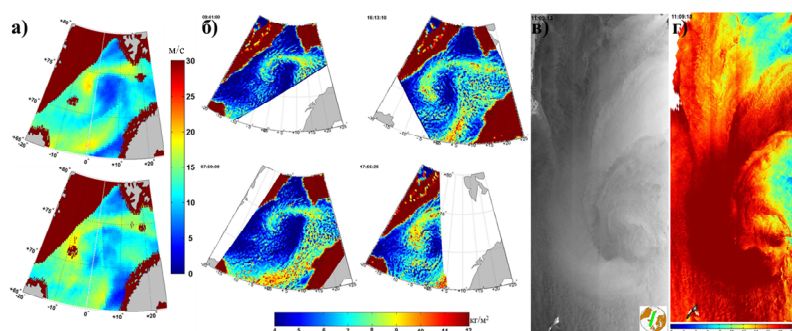
б) поле скорости приводного ветра по данным радиометра SSM/I;

Рисунок 1. Пример идентификации полярного циклона по данным микроволнового радиометра SSM/I в Баренцевом море 19 января 2000

В разделе 2.2.2 описывается мультисенсорный подход для дополнительного анализа обнаруженных полярных циклонов. Привлечение дополнительных данных для более детального анализа проводилось с целью подтверждения возможности использования метода обнаружения ПЦ для последовательной идентификации ПЦ без привлечения дополнительных данных.

Для каждого обнаруженного случая был осуществлен совместный анализ полей влагозапаса атмосферы и скорости приводного ветра по данным микроволнового радиометра SSM/I и полей ветра по данным скаттерометра QuikSCAT SeaWinds, а также полей облачности по данным инфракрасного радиометра NOAA AVHRR. Дополнительно к анализу был привлечен архив снимков радара с синтезированной апертурой Envisat Advanced SAR (ASAR; <http://sat.nersc.no/archive>).

К сожалению, снимки PCA не являются регулярными и малоприспособлены для оперативного использования, тем не менее, они могут являться важным инструментом для подтверждения найденных ПЦ (рисунок 2).



а) поля скорости приводного ветра по данным радиометра SSM/I;

б) поля влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным радиометра SSM/I;

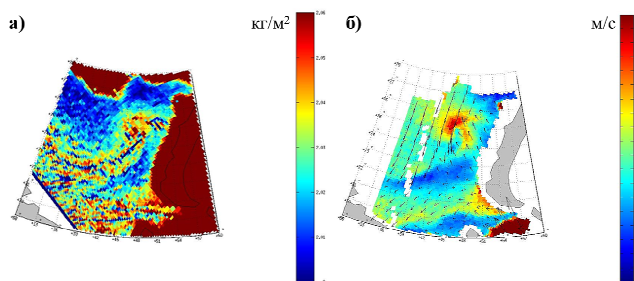
в) снимок PCA Envisat ASAR в 11:09:13;

г) поле ветра, восстановленное по данным Envisat ASAR с использованием модели CMOD4 (<http://sat.nersc.no/>) в 11:09:13.

Рисунок 2. Полярный циклон 18 Января 2007 года в Гренландском море

Данные скаттерометра являются дополнительной регулярной информацией о поле ветра высокого временного разрешения (в полярных районах), отличающейся от РСА более низким пространственным разрешением (25×25 км или 12.5×12.5 км).

Пример подтверждения ПЦ по скаттерометрическим данным спутника QuikSCAT представлен на рисунке 3



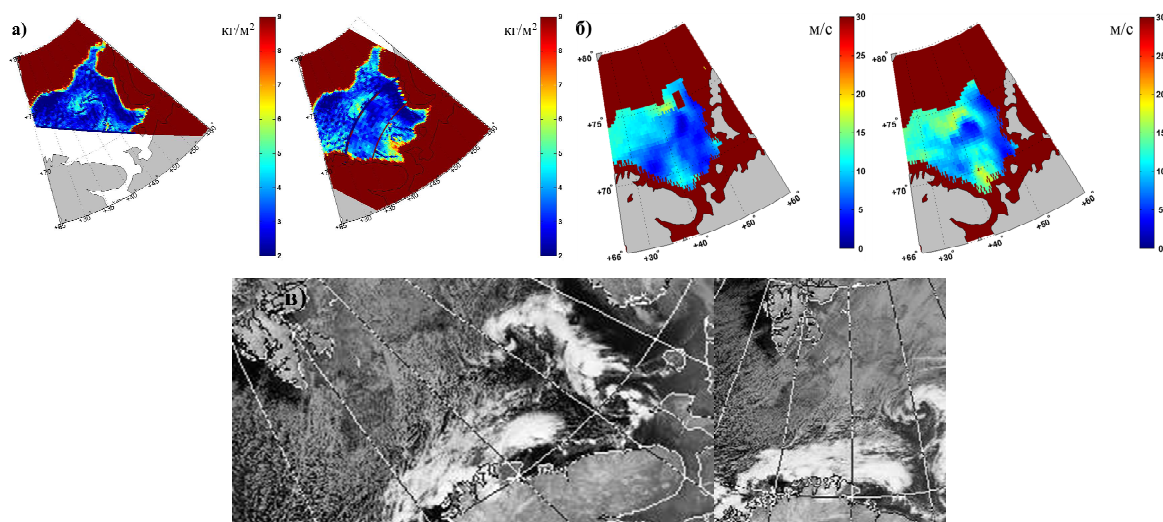
а) поле влагозапаса атмосферы, восстановленное по данным радиометра SSM/I в 12:49;
б) поле приводного ветра по данным QuikSCAT 15:39.

Рисунок 3. Полярный циклон над восточной частью Баренцева моря 18 января 2007

Изображения инфракрасного диапазона считаются традиционным инструментом при изучении циклонов разных масштабов. Спутниковые данные ИК диапазона позволяют судить о воздушных массах и физических процессах, вовлеченных в образование рассматриваемых систем, обеспечивают информацией о форме и структуре облачности, ассоциированной с ПЦ.

Для изучения проявлений ПЦ в полях облачности использовался архив инфракрасных снимков радиометра AVHRR (<http://www.sat.dundee.ac.uk/>). Практически всегда на изображениях AVHRR можно выделить одну или несколько вихревых структур, и лишь небольшой процент из них оказывается ПЦ.

Пример изображения в инфракрасном диапазоне, на котором ПЦ проявляется в поле облачности, приведен на рисунке 4.



а) поля влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным радиометра SSM/I в 12:12 и 13:54;

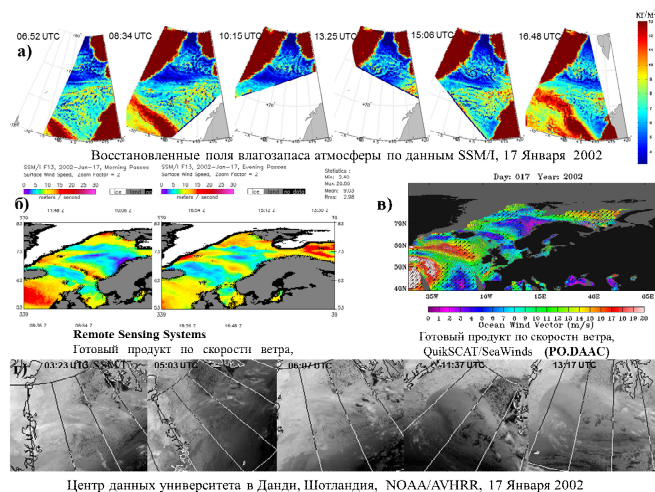
б) поля скорости приводного ветра по данным радиометра SSM/I в 12:12 и 13:54;

в) поля облачности в инфракрасном диапазоне по данным прибора AVHRR в 11:05 и 12:01;

Рисунок 4. Полярный циклон над Баренцевым морем 01 марта 2006

В большинстве случаев обнаруженные по радиометрическим измерениям ПЦ проявляются в виде ярко выраженного облачного вихря на изображениях AVHRR.

Несмотря на то, что данные радиометров инфракрасного диапазона обладают высоким пространственным разрешением, проявление ряда ПЦ в поле облачности могут быть скрыты верхними облаками. Пример подобного случая приведен на рисунке 5.



а) поля влагозапаса атмосферы, восстановленные по данным радиометра SSM/I;
 б) поля скорости приводного ветра по данным радиометра SSM/I;
 в) поле приводного ветра по данным QuikSCAT;
 г) поля облачности в инфракрасном диапазоне по данным прибора AVHRR.
 Рисунок 5. Полярный циклон 17 января 2002, не идентифицирующийся на инфракрасных изображениях радиометра AVHRR

В данной работе установлено, что порядка 5% ПЦ не проявляются на инфракрасных снимках. Несмотря на все достоинства спутниковых данных в ИК диапазоне, существует необходимость привлечения дополнительных данных при систематическом исследовании ПЦ. Таким образом, наиболее полная статистика ПЦ не может быть построена, основываясь исключительно на изображениях радиометров AVHRR.

На основе анализа дополнительных спутниковых данных для найденных ПЦ можно сделать вывод, что идентификация ПЦ может осуществляться только в полях влагозапаса атмосферы и скорости приводного ветра, восстановленных по данным микроволновых радиометров, без использования дополнительной информации. Новый подход к обнаружению ПЦ, основанный на данных спутниковых микроволновых радиометров, продемонстрировал, что эти данные являются необходимым и достаточным инструментом при исследовании ПЦ.

В третьей главе представлены результаты анализа пространственных и сезонных особенностей распределения частоты образования полярных циклонов и закономерности распределения количества полярных циклонов по их основным характеристикам над морями Северо-Европейского бассейна за период с 1995–2009 гг.

В разделе 3.1 представлены закономерности пространственного и сезонного распределения полярных циклонов.

Используемый в работе метод идентификации ПЦ применяется для создания новой климатологии, в которой учтено максимально возможное количество случаев возникновения ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна за период с 1995 по 2009 гг. Применяемый в данной работе подход является новым и наиболее точным, поэтому результаты анализа распределения и интенсивности ПЦ, полученные с его использованием, существенно отличны от результатов, приведенных в предыдущих исследованиях.

За весь период исследования было найдено 637 ПЦ (рисунок 6а). Каждое вихревое образование, идентифицированное в поле влагозапаса атмосферы и соответствующее предъявляемым критериям (диаметр менее 1000 км, время жизни менее 48 ч), было проверено на наличие высоких скоростей ветра (более 15 м/с). Данные критерии соответствуют широко используемому определению ПЦ, приведенному в работе Rasmussen and Turner (2003). Летние месяцы (с мая по август) не рассматривались. Расширенные зимние сезоны, за которые рассчитывалось количество ПЦ, включали месяцы с сентября по декабрь одного года и с января по апрель следующего года. Также было определено среднее количество ПЦ за каждый месяц над морями Северо-Европейского бассейна (рисунок 6б).

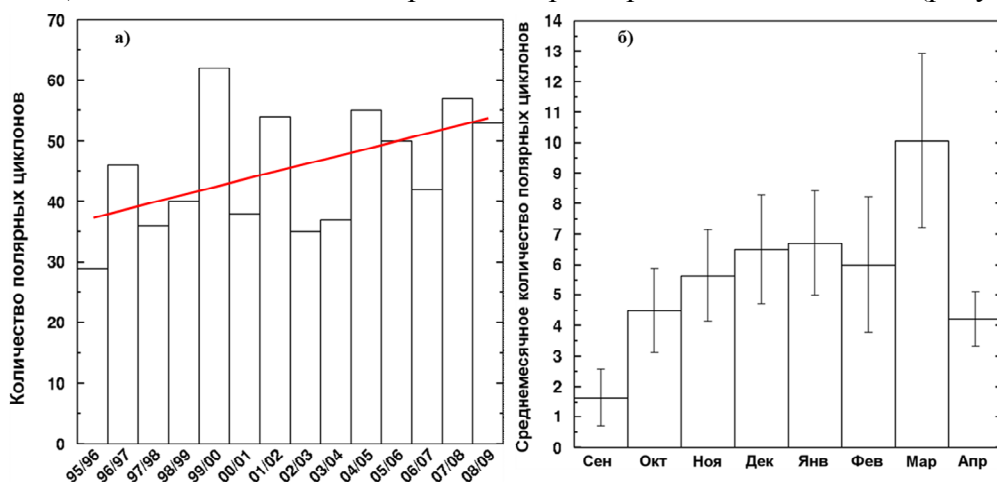


Рисунок 6 Сезонное (а) и среднемесячное (б) количество обнаруженных полярных циклонов за период с 1995 по 2009 гг. над морями Северо-Европейского бассейна. Линии ошибок показывают стандартное отклонение.

Из рисунка 6а следует небольшая тенденция (2.6%) к увеличению количества ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна. Максимальное количество ПЦ - 62 - зафиксировано в сезон 1999/2000, минимальное количество найденных циклонов составило 35 (сезон 2002/2003). Среднее количество ПЦ за сезон составляет 45.5.

Сравнение результатов, полученных в данной работе, может быть проведено с представленными в работе Blechschmidt (2008), где применяется похожая методика определения ПЦ (вместо микроволновых данных использовались данные радиометра AVHRR, работающего в инфракрасном диапазоне) и используется, как и в данной работе, определение ПЦ, предложенное Rasmussen и Turner (2003). Из различий можно отметить то, что в работе Blechschmidt (2008) в регион исследования включено море Ирмингера, а также рассматриваются летние месяцы. В указанной работе за 2004 и 2005 год было найдено 51 и 39 случаев образования ПЦ, соответственно. В данной работе за те же года обнаружено 52 и 39 случаев образования ПЦ, соответственно.

51 случаев ПЦ, соответственно.

В отличие от других работ, в которых максимальное количество ПЦ наблюдается в январе (Zahn and von Storch, 2008; Noer et al., 2011), по результатам расчетов, произведенных в данном исследовании, ярко выраженный максимум количества ПЦ зафиксирован в марте со среднемесячным значением в 10.1 (рисунок 6б). В январе это значение составляет 6.7, что больше, чем во все другие месяцы, однако, значительно меньше, чем в марте. Февральский минимум, наблюдаемый в предыдущих работах (например, Wilhelmsen, 1985; Noer et al., 2011), крайне слабо выражен в полученных в данной работе результатах и не является значимым, поскольку разница между средним количеством ПЦ, например, за февраль и январь равна 0.7, в то время как стандартное отклонение составляет 4.4 для февраля и 3.4 для января. Это, однако, согласуется с работой Noer et al. (2011), в которой показано, что найденный в ней февральский минимум также не является статистически значимым. В сентябре и апреле зафиксировано наименьшее среднемесячное количество ПЦ, а именно 1.5 и 3.9. Среднемесячное значение количества ПЦ за весь период составляет 5.9.

Пространственное распределение полярных циклонов в Северо-Европейском бассейне представлено на рисунке 7.

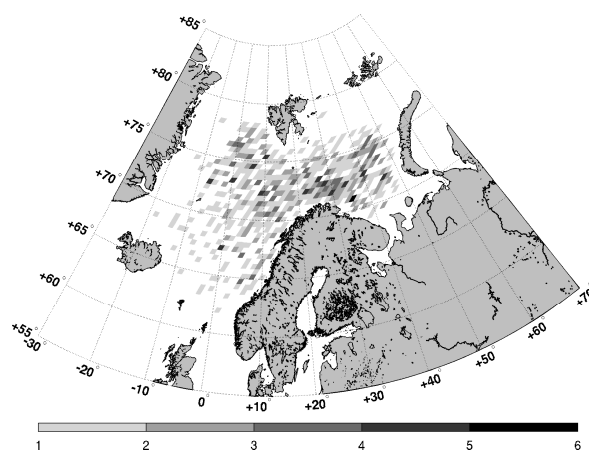


Рисунок 7. Пространственное распределение полярных циклонов над морями Северо-Европейского бассейна за период с 1995 по 2009 гг.

На рисунке 7 изображены районы, где ПЦ впервые были обнаружены, сгруппированные в ячейки размером 50×50 км. Большая часть из идентифицированных ПЦ, а именно 42.5%, образовалась в Норвежском море. Немного меньше ПЦ было обнаружено в Баренцевом море – 41%. Доля ПЦ в Баренцевом море по результатам данной работы оказалась гораздо выше, чем сообщалось ранее в предшествующих климатологических работах (Blechschmidt, 2008; Noer et al., 2011). Это может быть объяснено более низким временным разрешением для Баренцева моря данных радиометра AVHRR со спутников NOAA, предоставляемых центром данных университета Данди, Шотландия, используемых в качестве основного источника данных в других работах. В Гренландском море насчитывается 16.5% обнаруженных ПЦ. Выявлены основные районы распространения ПЦ. В Баренцевом море это север Норвегии (мыс Нордкап) и западная часть Новой Земли, в Гренландском море - над Гренландской котловиной, в Норвежском море - над Лофотенской котловиной. Мыс

Нордкап выделяется как основной регион генерации ПЦ.

В разделе 3.2 анализируется взаимосвязь между циклонической активностью и площадью ледяного покрова в исследуемом регионе.

При сопоставлении для всего исследуемого региона среднемесячной площади льда в сентябре с количеством ПЦ, образовавшихся за период с сентября по декабрь соответствующего года, был получен низкий коэффициент корреляции ($R = -0.34$). Взаимосвязь между среднемесячной площадью льда в январе и количеством ПЦ с января по апрель описывается умеренным коэффициентом корреляции, составляющим $R = -0.49$. Однако, для этого же случая, когда исследуемая область была сужена до одного Баренцева моря, установлена высокая корреляция ($R = -0.85$) со статистической значимостью выше 99.9% (рисунок 8). Это также единственный случай, когда нулевая гипотеза об отсутствии взаимосвязи между количеством ПЦ и площадью льда была отвергнута на основе результатов двухстороннего t -теста. Этот результат отчетливо показывает, что уменьшение площади льда ведет к увеличению частоты образования ПЦ. Этот эффект наиболее заметен в Баренцевом море, где межгодовая изменчивость площади льда наиболее ярко выражена.

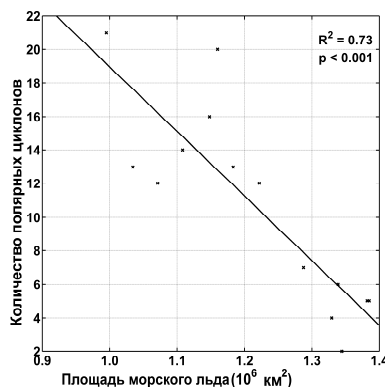


Рисунок 8. Зависимость количества полярных циклонов за период с января по апрель от площади ледяного покрова в январе для Баренцева моря

Таким образом, сокращение ледяного покрова в Северном Ледовитом океане приводит к появлению новых районов открытой воды, потенциально пригодных для зарождения ПЦ. Такие моря, как море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское, раньше закрытые ледяным покровом в течение всего года, теперь летом и осенью становятся свободными ото льда, а значит, подверженными возникновению и развитию ПЦ.

В разделе 3.3 приводятся оценки средних многолетних характеристик полярных циклонов и распределения количества полярных циклонов по основным характеристикам.

В разделе 3.3.1 описывается методика определения основных характеристик полярных циклонов.

Для каждого обнаруженного ПЦ были рассчитаны индивидуальные характеристики: диаметр, время жизни, пройденное расстояние, скорость перемещения, максимальное значение скорости приводного ветра, развиваемое в циклоне, максимальное и минимальное значение влагозапаса атмосферы. Поскольку ПЦ не может быть описан формой идеальной окружности, то для расчета диаметра ПЦ усреднялись длины большой и малой полуоси

эллипса, описывающего сигнатуру ПЦ, проявляющуюся в восстановленных полях влагозапаса атмосферы. Далее, все доступные измерения для каждого ПЦ были усреднены для того, чтобы получить средний диаметр на протяжении времени жизни циклона. Время жизни ПЦ на первом этапе было определено по данным радиометра SSM/I, как разница между первым и последним временем наблюдения ПЦ. Далее, изображения радиометра AVHRR были использованы для увеличения точности оценки времени жизни ПЦ, поскольку данные спутника DMSP F-13 для региона исследования отсутствуют с 7 вечера до 3 утра из-за особенностей геометрии сканирования прибора SSM/I, а также орбиты спутника. Для каждого найденного ПЦ были определены координаты его центра в момент его попадания в полосу обзора прибора SSM/I, по которым была построена траектория движения циклона. Пройденное расстояние определено, как сумма дистанций, пройденных ПЦ между последовательными точками на построенной траектории. Скорость передвижения рассчитывалась путем деления пройденного расстояния на время жизни ПЦ, определенное по микроволновым данным. Найденные эллипсы, описывающие ПЦ, также использовались для нахождения максимальных скоростей приводного ветра. В пределах этих эллипсов осуществлялся поиск максимальных значений скоростей приводного ветра.

В разделе 3.3.2 проводится анализ полученных основных характеристик полярных циклонов.

Полученные индивидуальные характеристики ПЦ (рисунок 9) представляют интерес в целях определения средних параметров, присущих данному классу мезомасштабных циклонов.

Для определения диаметра ПЦ использовались вихревые структуры в полях влагозапаса по данным SSM/I. Превышение Q над фоновым значением на 2 кг/м^2 в момент максимального развития ПЦ являлось критерием для определения его диаметра. Распределение обнаруженных ПЦ по диаметру представлено на рисунке 9а.

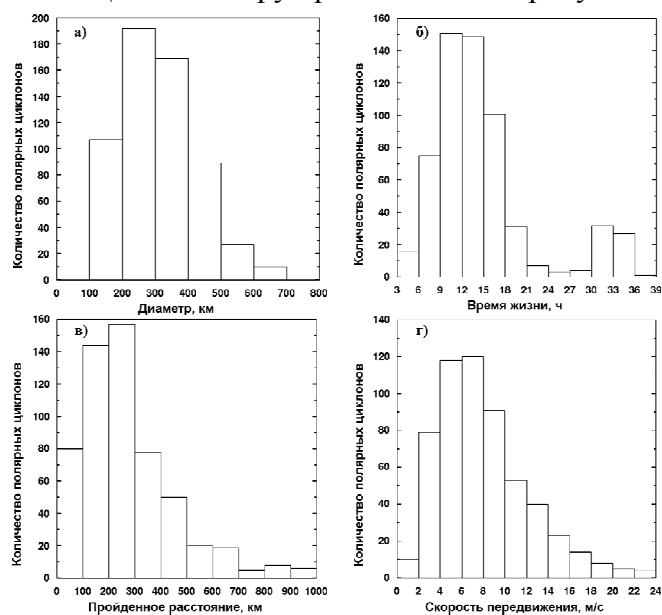


Рисунок 9. Распределение обнаруженных полярных циклонов по (а) диаметру, (б) времени жизни, (в) пройденному расстоянию, (г) скорости передвижения

Около 2/3 вихрей имеют диаметр 200-400 км, обнаружено 107 ПЦ диаметром 100-200 км. Диаметр большинства исследованных ПЦ не превышает 600 км. Следует отметить, что, несмотря на то, что в работе отбирались мезовихри диаметром до 1000 км, ни одного ПЦ с диаметром более 800 км не было обнаружено. Следует также подчеркнуть, что ПЦ малого диаметра (менее 50 км) выпадают из рассмотрения в рамках настоящего исследования из-за низкого пространственного разрешения пассивных микроволновых данных (25 км). Однако, как показано в работе Harold et al. (1999), доля мезомасштабных циклонов, имеющих диаметр до 50 км, составляет лишь 0.25%.

Характерной особенностью ПЦ является короткий жизненный цикл по сравнению с циклонами синоптического масштаба. Поэтому для увеличения временного разрешения при оценке продолжительности жизни ПЦ дополнительно использовались данные радиометра SSM/I совместно с данными радиометра AVHRR в инфракрасном диапазоне. На рисунке 9б представлено полученное распределение ПЦ в зависимости от продолжительности их жизни. Для большинства рассмотренных ПЦ (401) время жизни составило 9-18 часов. Часть ПЦ (105) просуществовала более 18 часов. Лишь около 10% всех исследованных случаев составили ПЦ, существующие более одних суток.

Расстояние, на которое перемещались обнаруженные ПЦ показано на рисунке 9в. Пройденное расстояние оценивалось по данным радиометра SSM/I. Половина (301) обнаруженных ПЦ прошли расстояние в 100-300 км. 80 циклонов переместились лишь на 0-100 км, 78 на 300-400 км. Дистанцию в 700-800 км прошли 5 циклонов. Кроме того, выявлено 5 циклонов, которые переместились на расстояние свыше 1000 км (~1010, 1300, 1400, 1600, 2300 км; не отображены на рисунке 9в).

Скорости передвижения найденных ПЦ за весь период исследования представлены на рисунке 9г. Наиболее характерная скорость передвижения ПЦ – 4-8 м/с (42%). Большинство ПЦ (72%) развивают скорость передвижения 2-10 м/с, 116 ПЦ двигаются со скоростью 10-16 м/с. Обнаружен 31 ПЦ, скорость передвижения которых достигает 16-24 м/с, 3 циклона имели скорости передвижения свыше 24 м/с (35, 36.4, 40 м/с; не отображены на рисунке 9г).

Значения скорости приводного ветра определялись по данным продукта Remote Sensing Systems (RSS), основанного на данных SSM/I. Средние и максимальные за сезон значения, а также среднемесячные и максимальные значения скорости приводного ветра за весь период исследования в обнаруженных ПЦ представлены на рисунке 10.

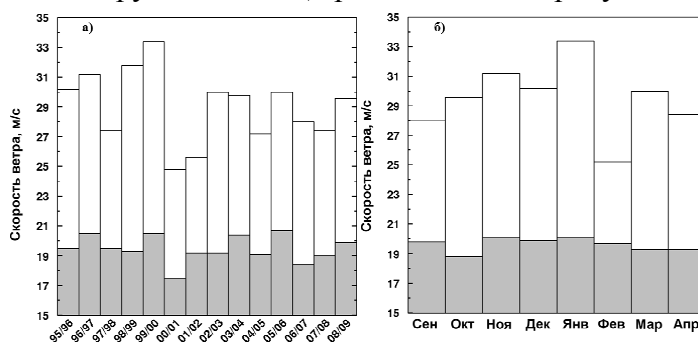


Рисунок 10 Средние (серые столбцы) за (а) сезон, (б) месяц и максимальные (белые столбцы) значения скорости приводного ветра, развивающейся в обнаруженных полярных циклонах

Из рисунка 10а следует, что за рассмотренный период интенсивность ПЦ не изменяется. Наименее интенсивные ПЦ наблюдаются в сезоне 2000/2001, когда средняя скорость ветра составила 17.5 м/с. В среднем, скорость приводного ветра, развиваемая в ПЦ, около 19-20 м/с. Наиболее интенсивный ПЦ за весь период был зафиксирован в сезоне 1999/2000 со скоростью ветра 33.4 м/с. В целом, интенсивность ПЦ не зависит от месяца и составляет в среднем 19-20 м/с (рисунок 10б). Максимальная скорость ветра была зафиксирована в январе, минимальная – в феврале.

В разделе 3.4 проводится анализ результатов.

Впервые для создания климатологии ПЦ был применен подход, основанный исключительно на спутниковых микроволновых данных. Мезомасштабная циклоническая завихренность идентифицировалась в восстановленных полях влагозапаса атмосферы. Далее, принадлежность обнаруженных мезовихрей к классу ПЦ устанавливалась путем применения критерия высокой скорости приводного ветра (более 15 м/с). Было обнаружено 637 ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна за 14 сезонов (1995/1996-2008/2009), что в среднем соответствует 45.5 ПЦ за сезон. Это значение больше приведенных ранее в работах, основанных на инфракрасных данных. Это может объясняться тем, что в отличие от инфракрасных радиометров, которым доступна информация лишь о верхнем слое облаков, с помощью микроволновых данных восстанавливаются интегральные параметры атмосферы. Таким образом, использование микроволновых радиометров предоставляет возможность обнаружения ПЦ, скрытых вышележащими облаками. В результате проведенного анализа было выявлено, что 32 случая ПЦ не могли быть идентифицированы на изображениях в инфракрасном диапазоне, что составляет приблизительно 5% от общего количества.

Как было отмечено в работе Claud et al. (2009), в климатологии ПЦ, основанной исключительно на микроволновых данных, количество ПЦ, принадлежащих бароклинному типу, может быть недооценено. Это утверждение справедливо для высокочастотных измерений (в частности, вблизи полосы поглощения водяного пара на частоте 183 ГГц, как в вышеупомянутой работе), при которых наблюдается эффект рассеивания на частицах льда. В данной работе используются низкочастотные измерения вблизи полосы поглощения водяного пара на 22.235 ГГц, что позволяет избежать проявления подобного эффекта.

Обнаружено, что частота появления ПЦ в Баренцевом море сравнима с частотой в Норвежском море. ПЦ в этих морях составляет 83.5% от всех обнаруженных. Для Баренцева моря найдена высокая корреляция ($R = -0.85$) между площадью ледяного покрова в январе и количеством ПЦ с января по апрель, показывающая, что увеличение площади морской поверхности свободной ото льда ведет к увеличению частоты образования ПЦ.

Наибольшее количество ПЦ обнаружено в марте (в среднем 10.1). В январе, в котором зарегистрирован максимум активности ПЦ в других климатологических работах (напр., Zahn and von Storch, 2008; Noer et al., 2011), найдено в среднем 6.7 случаев, что больше, чем в другие рассмотренные месяцы, но значительно меньше по сравнению с мартом.

Получены следующие средние характеристики ПЦ: диаметр - 298 км (стандартное

отклонение 110 км), время жизни - 14.7 ч (стандартное отклонение 7.7 ч), скорость передвижения - 8.1 м/с (стандартное отклонение 4.2 м/с), пройденное расстояние - 284 км (стандартное отклонение 213 км), максимальная скорость приводного ветра, развивающаяся в ПЦ - 19.6 м/с (стандартное отклонение 3.6 м/с).

Отмечена тенденция к увеличению частоты появления ПЦ, которая составляет 1.18 случаев в сезон, при этом около половины этого значения приходится на март. Все другие исследования, оценивающие тенденции изменения частоты появления ПЦ, основываются на использовании данных глобальных атмосферных реанализов или модельных результатов и отмечают либо отсутствие тенденции (а именно, 0.024 случаев в год (Zahn and von Storch, 2008)), либо отрицательную тенденцию, обнаруженную при расчетах с использованием климатологических сценариев IPCC (Zahn and von Storch, 2010). Однако, к подобным результатам следует подходить с осторожностью, поскольку большая часть ПЦ не отображается в данных реанализов и не может быть воспроизведена даже наиболее современными моделями.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Создана база, включающая в себя все идентифицированные ПЦ. Таким образом, впервые получена климатология ПЦ, основанная исключительно на данных спутниковых микроволновых радиометров;
2. За 14 сезонов с 1995/1996 по 2008/2009 гг. было найдено 637 ПЦ, что составляет 45.5 циклонов за сезон. Эта оценка частоты появления ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна значительно превосходит приведенные ранее в других климатологических исследованиях ПЦ;
3. В 5% случаев ПЦ не обнаруживаются при использовании исключительно инфракрасных спутниковых снимков;
4. Впервые обнаружено, что наиболее благоприятные условия для развития ПЦ в данном регионе складываются в марте, при этом в этот месяц образуется в полтора раза больше полярных циклонов по сравнению с другими месяцами;
5. Обнаружена тенденция к увеличению количества ПЦ за исследуемый период (1.18 случая за сезон);
6. В результате проведенного анализа пространственного распределения ПЦ выявлены основные районы их генерации. В Баренцевом море это север Норвегии (мыс Нордкап) и западная часть Новой Земли, в Гренландском море - над Гренландской котловиной, и в Норвежском море - над Лофотенской котловиной;
7. Рассчитаны и проанализированы среднегодовые характеристики ПЦ в рассматриваемом регионе, а именно, средние диаметр, время жизни, скорость перемещения, пройденное расстояние, максимальная скорость приводного ветра, максимальные и минимальные значения влагозапаса атмосферы, а также распределения количества ПЦ по этим характеристикам;
8. Показано, что увеличение площади морской поверхности свободной ото льда ведет к увеличению частоты образования ПЦ. Этот эффект наиболее заметен в Баренцевом

море ($R = -0.85$), где межгодовая изменчивость площади льда наиболее ярко выражена.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Издания из списка ВАК:

1. **Smirnova J.E.**, P.A. Golubkin, L.P. Bobylev, E.V. Zabolotskikh, B. Chapron Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // Geophysical Research Letters. Vol. 42. 2015. P.5603-5609. doi:10.1002/2015GL063865
2. **Ю.Е. Смирнова**, Е.В. Заболотских, Л.П. Бобылев, В.И. Сычев Исследование полярных циклонов в Балтийском море методами спутникового дистанционного зондирования // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета №21. 2011. С. 95-106.
3. Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., **Смирнова Ю.Е.** Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета №16. 2010. С. 59-76.
4. **Смирнова Ю.Е.**, Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Шапрон Б. Статистические характеристики полярных циклонов в морях Северо-Европейского бассейна по данным спутниковых микроволновых радиометров // Исследование Земли из космоса. (принята в печать в № 1-2, 2016)

Патенты:

1. **Смирнова Ю.Е.**, Заболотских Е.В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2013620880: База данных полярных циклонов по данным микроволнового радиометра SSM/I с 1995 по 2009 для морей Северо-Европейского бассейна. Заявка № 2013620578. Дата поступления 11 июня 2013г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 31 июля 2013г.
2. Иванов Д.А., **Смирнова Ю.Е.**, Заболотских Е.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616998 SIMPLE: «Полуавтоматический метод расчета параметров полярных циклонов в высоких широтах» Заявка № 2013614834. Дата поступления 11 июня 2013г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2013г.
3. Иванов Д.А., **Смирнова Ю.Е.**, Заболотских Е.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616997 VIrTuAL: «Метод построения траекторий движения полярных циклонов в высоких широтах по данным спутниковых пассивных микроволновых радиометров» Заявка № 2013614831. Дата поступления 11 июня 2013г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2013г.