На правах рукописи

ЗАБОЛОТСКИХ Елизавета Валериановна

РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВЫХ ПАССИВНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ЗОНДИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОКЕАН-АТМОСФЕРА» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Российский государственный гидрометеорологический университет" (РГГМУ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Троицкая Юлия Игоревна
заведующая отделом, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

доктор физико-математических наук, Иванов Владимир Владимирович
ведущий научный сотрудник, Институт Арктики и Антарктики, Санкт-Петербург

доктор физико-математических наук, профессор Мелентьев Владимир Владимирович
профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ведущая организация:

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Защита диссертации состоится 10 ноября 2016 г. в 15:30 час. на заседании Диссертационного совета Д212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр, 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГМУ.

Автореферат разослан «__» _________ 2016 г.
Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук Воробьев Владимир Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Спутниковые микроволновые радиометрические измерения характеризуются возможностью получения регулярной оперативной информации об атмосфере и океане и вносят существенный вклад в улучшение анализа погодообразующих процессов и климата. Информация о приводном ветре имеет первостепенное значение при изучении взаимодействия океана и атмосферы, циркуляции океанических вод и их влияния на погоду и климат Земли. Точные оперативные измерения приводного ветра необходимы для уменьшения рисков, связанных с экстремальными явлениями погоды. Влагозапас атмосферы и водозапас облаков нужны для прогноза осадков и входят, наряду с интенсивностью осадков, в качестве важнейших параметров в климатические модели. Карты влагозапаса позволяют судить о положении атмосферных фронтов и движении воздушных масс. Особую ценность данные радиометров представляют в экстремальных условиях погоды. Экстремальные погодные явления - тропические, внетропические и полярные циклоны, - сопровождаются штормовыми ветрами, высокими волнами, ливневыми осадками. В таких условиях существующие готовые спутниковые продукты по влагозапасу атмосферы, водозапасу облаков и скорости приводного ветра либо обладают большими погрешностями, либо закрыты обширными масками. Маскирование производится на основе физически не обоснованных фильтров, что приводит к отсутствию информации именно там, где она имеет первостепенное значение для снижения рисков, связанных с развитием штормовых и ураганных ветров. Поэтому тема исследования, связанная с разработкой новых методов оценки параметров океана и атмосферы, применимых в экстремальных погодных условиях, представляется актуальной и имеющей высокую практическую значимость.

Степень разработанности темы. Запуск Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) в 1987 году положил начало построению долговременных климатических рядов данных по влагозапасу атмосферы, водозапасу облаков и скорости приводного ветра над свободной ото льда морской поверхностью. В крупнейшем мировом центре обработки спутниковых данных Remote Sensing Systems (RSS – http://remss.com) при помощи современных методик обрабатывают и выкладывают в свободном доступе спутниковые продукты на основе использования измерений спутниковых микроволновых радиометров SSM/I, AMSR-E, AMSR2 и др.

Методы изучения окружающей среды, основанные на использовании данных измерений спутниковых микроволновых радиометров, развиваются уже более полувека [*Alishouse et al.*, 1990; *Frate and Schiavon*, 1998; *Wang et al.*, 2009; *Kazumori*, 2012; *Krasnopolsky*, 2013; *Wentz*, 2013]. Первые алгоритмы, восстановления геофизических параметров по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров, были созданы для SSM/I [*Wentz*, 1997]. Дальнейшее развитие они получили после запуска радиометров серии Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) в 2002 г.[*Kawanishi et al.*, 2003]. Непосредственное отношение к развитию методов оценки геофизических параметров имеют вопросы надлежащей калибровки измерений, которую в последние годы проводят путем сопоставления измерений расчетным значениям сигнала для известных параметров океана и атмосферы [*Wentz and Meissner*, 2000; *Gentemann et al.*, 2010].

Расширение возможностей использования спутниковых данных напрямую связано с развитием эффективных алгоритмов, обеспечивающих высокие точности восстановления геофизических параметров. Существующие методы обладают требуемой точностью лишь при благоприятных погодных условиях – отсутствии осадков и облачности с водозапасом, большим 0.5 кг/м^2, и при скорости ветра, не превышающей 15 м/с. С ухудшением погодных условий погрешности методов возрастают в несколько раз [*Wentz and Meissner*, 2000; *Shibata et al.*, 2003; *Shibata*, 2006]. Восстановление полей ветра при экстремальных ветрах представляет особую проблему, так как для штормовых условий собрано недостаточно экспериментального материала, позволяющего строить достоверные геофизические модельные функции [*Bourassa et al.*, 2010; *Hanafin et al.*, 2012].

В связи с этим, несмотря на большое количество методов, остается актуальной проблема создания “всепогодных” алгоритмов, эффективных при расширенном диапазоне погодных условий, включающем облачность с водозапасом, превышающим 0.5 кг/м^2 и экстремальные ветра со скоростью больше 15 м/с. Именно такие алгоритмы позволят проводить исследования экстремальных погодных явлений, связанных с развитием штормовых ветров, облачностью большого водозапаса и осадками, таких как полярные, внетропические и тропические циклоны. Наличие у радиометров серии AMSR каналов измерений в С- и Х- диапазоне –чувствительных к приводному ветру даже в условиях осадков, - открывает принципиальную возможность восстановления ветра в таких условиях, в которых картирование полей ветра невозможно с использованием других спутниковых измерений. Тем не менее, до сих пор не появилось работ, свидетельствующих об успешной реализации данной возможности [*Meissner and Wentz*, 2009; *Zabolotskikh et al.*, 2015a].

Цель исследования. Цель данного исследования – создать комплекс методов количественной оценки параметров системы океан – атмосфера по данным измерений спутникового микроволнового радиометра последнего поколения AMSR2, эффективных в расширенном диапазоне погодных условий, включающем экстремальные явления, такие как полярные, внетропические и тропические циклоны, характеризующиеся штормовыми ветрами, превышающими 15 м/с, и обеспечивающих возможность создания новых спутниковых продуктов.

Главные научные задачи работы заключались в том, чтобы на основании моделирования излучения системы океан – атмосфера обосновать диапазон физических условий, при которых спутниковые пассивные микроволновые измерения обладают чувствительностью к параметрам океана и атмосферы, создать методы восстановления геофизических параметров, применимые во всем обоснованном диапазоне состояний системы океан – атмосфера, провести модельную калибровку спутниковых измерений микроволновых радиометров, верифицировать созданные алгоритмы с помощью независимых измерений параметров и продемонстрировать эффективность их применения при изучении экстремальных погодных явлений.

Объектами исследования в данной работе являются а) параметры системы океан – атмосфера: *влагозапас атмосферы* (*Q*) - интегральное содержание водяного пара в столбе атмосферы единичного сечения, *водозапас облаков* (*W*), - интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаках, *скорость приводного ветра* (*V*), *интенсивность осадков* (*R*), полное *атмосферное поглощение* на частоте 10.65 ГГц (τ), представляющее собой параметр, на основании которого маскируются области с осадками при восстановлении параметров интегрального влагосодержания атмосферы

Q и *W*, и б) экстремальные явления *–полярные и тропические циклоны*, при изучении которых используются разработанные методы.

Предметом исследования являются *методы восстановления параметров океана и атмосферы* по данным спутниковых микроволновых радиометров, основанные на численном моделировании уходящего излучения системы океан – атмосфера и использовании нейронных сетей (НС), эффективные в расширенном диапазоне погодных условий, включающем экстремальные ветра и мощную облачность, а для скорости приводного ветра - и осадки.

Задачи исследования. Для достижения цели исследования в работе решались следующие основные задачи:

– моделирование радиояркостной температуры ($T_я$) излучения системы океан – атмосфера для спутниковых радиометров SSM/I, AMSR-E и AMSR2;
– проведение модельных расчетов $T_я$ для базы данных параметров атмосферы и океана, представляющей весь диапазон изменчивости параметров, включая экстремальные погодные явления;
– проведение модельной калибровки спутниковых измерений SSM/I, AMSR-E и AMSR2 - определение калибровочных поправок для перехода от расчетов к измерениям;
– разработка методов восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным AMSR2, применимых над морскими поверхностями, свободными ото льда, в условиях без осадков, и их валидация, в том числе, в условиях штормовых ветров;
– разработка метода фильтрации осадков для серий радиометров AMSR, основанных на использовании восстановленного атмосферного поглощения на частоте 10.65 ГГц;
– разработка нового метода восстановления интенсивности дождя над морскими поверхностями, свободными ото льда, по данным измерений AMSR2, основанного на использовании низкочастотных измерений на каналах C- и X-диапазона;

- разработка метода восстановления скорости приводного ветра по данным измерений AMSR2, применимого в условиях тропических циклонов, сопровождающихся развитием ураганных ветров и осадками;
- разработка метода фильтрации радиочастотных помех в C- и X- диапазоне в районах океана;
- разработка усовершенствованной геофизической модельной функции микроволнового излучения океана в ураганах в C-диапазоне;
- применение разработанных методов для изучения экстремальных погодных явлений: тропических и полярных циклонов, картирование полей ветра по данным измерений AMSR2 для базы данных тропических циклонов за 2012 – 2015 гг.

Методология и методы исследования. Основой решения поставленных задач является физическое моделирование излучения системы океан – атмосфера, в том числе для условий, сопровождающихся сильными (> 15 м/с) ветрами. Моделирование $T_я$ микроволнового излучения для частот, превышающих X- диапазон, проводится без учета рассеяния, т.е. для условий, характеризующихся отсутствием осадков, в то время как $T_я$ на частотах C- и X- диапазона рассчитывается с учетом ослабления излучения слоем осадков. Проведение численного эксперимента по замкнутой схеме позволяет создать методы восстановления параметров с использованием результатов модельных расчетов. Выполнение модельной калибровки спутниковых измерений SSM/I, AMSR-E и AMSR2 дает возможность определить калибровочные поправки, ответственные суммарно за неточности геофизической модели и погрешности внутренней радиометрической калибровки приборов. Данные калибровочные поправки позволяют применять алгоритмы, настроенные на результатах модельных расчетов, к данным спутниковых измерений. Тестирование методов проводится с использованием данных независимых измерений геофизических параметров. Все методы основаны на использовании нейронных сетей на основе многослойного персептрона для решения обратной задачи. Использование специальных подходов, современных моделей взаимодействия микроволнового излучения со средой и корректирующих поправок к $T_я$ позволило добиться высокой точности методов восстановления параметров в условиях экстремальных погодных явлений, включающих штормовые (более 15 м/с) ветра, облачность и осадки, оцененной на основании сравнениея с данными контактных измерений.

В работе была использована эмпирическая параметризация коэффициента излучения океана, основанная на обобщении результатов радиометрических измерений при ветрах, больших 15 м/с. Следующим шагом стало усовершенствование геофизической модельной функции (ГМФ) микроволнового излучения океана в ураганах в С-диапазоне, представляющее собой уточнение ГМФ при ветрах, превышающих 33 м/с. Это уточнение основано на создании и использовании базы данных измерений для тропических циклонов и использовании ряда обоснованных допущений при решении уравнения переноса микроволнового излучения в системе океан – атмосфера в условиях ураганов.

Поскольку ряд методов – метод восстановления скорости приводного ветра и метод восстановления интенсивности осадков – используют измерения на каналах С- и Х- диапазона, необходимым элементом исследования стала разработка метода фильтрации радиочастотных помех над районами океана. Без такой фильтрации восстановленные значения параметров могут оказаться ошибочными из-за наличия искусственных источников микроволнового излучения. Метод фильтрации радиочастотных помех основан на определении пороговых значений для функций измерений на разных каналах радиометров для диапазона их естественной изменчивости.

Наконец, разработанные методы были применены для изучения таких опасных экстремальных явлений, как полярные циклоны (ПЦ). В частности, был разработан метод идентификации полярных циклонов в полях влагозапаса атмосферы, позволяющий детектировать эти атмосферные явления в условиях наличия верхнего слоя облаков. Метод был применен для идентификации ПЦ в восточном секторе российской Арктики.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней **впервые**

– разработан новый метод восстановления скорости приводного ветра по данным радиометра AMSR2, применимый в условиях тропических циклонов [*Zabolotskikh et al.*, 2014б, 2015а];

- разработаны новые методы восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным радиометра AMSR2, применимые, в том числе, при штормовых ветрах [*Заболотских и Шапрон*, 2016а];
- разработан новый метод фильтрации осадков для серий радиометров AMSR [*Zabolotskikh et al.*, 2013];
- разработан новый метод восстановления интенсивности дождя по данным AMSR2 [*Заболотских и Шапрон*, 2016б, *Zabolotskikh and Chapron*, 2015в];
- получены значения калибровочных поправок, позволяющих перейти от модельных значений радиояркостных температур к измеренным радиометрами SSM/I, AMSR-E и AMSR2 [*Zabolotskikh et al.*, 2014а, *Заболотских и др.*, 2013(а,б)];
- разработан новый метод фильтрации радиочастотных помех в C- и X-диапазоне в районах океана [*Zabolotskikh et al.*, 2015б];
- новые методы верифицированы на основании использования данных независимых измерений [*Zabolotskikh et al.*, 2014б; *Zabolotskikh and Chapron*, 2015в];
- разработана усовершенствованная геофизическая модельная функция микроволнового излучения океана в ураганах в C-диапазоне для скоростей ветра, превышающих 33 м/с [*Zabolotskikh et al.*, 2016а];
- создана база данных тропических циклонов за 2012 – 2015 гг. с картированием скоростей приводного ветра [*Reul et al.*, 2016];
- разработан новый метод идентификации полярных циклонов в полях влагозапаса атмосферы, восстановленных по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров [*Bobylev et al.*, 2011].
- выявлены полярные циклоны в восточном секторе Арктике и получены предварительные выводы об условиях их формирования и распространенности [*Zabolotskikh et al.*, 2016б, *Заболотских и др.*, 2015].

Теоретическая и практическая значимость работы определяется получением новых методов восстановления параметров океана и атмосферы в экстремальных погодных условиях. Разработанные подходы, основанные на физическом моделировании и анализе данных спутниковых измерений, можно применять для других радиометров. Сами методы и поля параметров атмосферы и океана могут быть использованы как в РГГМУ, так и мировым научным сообществом, центрами обработки и распространения спутниковых данных, мировыми и региональными центрами прогнозов.

Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение, связанное с созданием нового инструмента изучения экстремальных погодных явлений, связанных с развитием штормовых и ураганных ветров. И если для параметров влагосодержания атмосферы в мировой науке существуют альтернативные методы, и можно говорить лишь о повышении точности и расширении диапазона применимости разработанных методов, то для скорости приводного ветра в тропических циклонах на сегодняшний день не создано никакой альтернативы. Поэтому данное исследование представляет собой существенный вклад в мировую науку, не говоря о практической ценности оперативной информации о полях ветра в ураганах, которая необходима при прогнозе их эволюции.

Разработанное программное обеспечение и базы данных, позволяющие моделировать $T_я$ уходящего излучения системы океан – атмосфера и решать обратные задачи с применением НС, могут быть использованы для решения самых разных задач спутниковой микроволновой радиометрии. Созданная база данных тропических циклонов (ТЦ) уникальна по информативности, поскольку включает не только результаты обработки данных измерений AMSR2, но и большое количество альтернативных спутниковых измерений скаттерометров, радиометров, радаров, спектральных радиометров, самолетных измерений скорости ветра. Данная база может быть использована для анализа и изучения ТЦ.

Новый метод идентификации ПЦ в полях влагозапаса атмосферы, позволяющий детектировать ПЦ в любых условиях, может быть использован центрами предупреждения об экстремальных погодных явлениях и службами обеспечения безопасности народно-хозяйственной деятельности в Арктике.

Диссертация выполнялась в рамках реализации плановых исследований по базовой теме государственного задания РГГМУ, в рамках проекта Мега-грант Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078), федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научнотехнологического комплекса России на 2014-2020 годы» (RFMEFI58615X0017, соглашение № 14.586.21.0017) гранта РФН «Мониторинг и прогноз экстремальных явлений в Арктике» №16-17-00122, федеральной целевой программы «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (RFMEFI61014X0006, соглашение № 14.610.21.0006), грантов РФФИ. Результаты работ по теме диссертации вошли составной частью в отчеты по этим темам и грантам. Итоги исследований используются в учебном процессе в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках курса «Спутниковая пассивная микроволновая радиометрия» по программе обучения «Спутниковая океанография».

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод восстановления скорости приводного ветра по данным радиометра AMSR2, позволяющий восстанавливать поля скорости приводного ветра в условиях тропических циклонов;
2. Методы восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным радиометра AMSR2, обладающие повышенной точностью при ветрах, превышающих 15 м/с;
3. Метод фильтрации осадков для серий радиометров AMSR, позволяющий существенно расширить область применения данных спутниковых микроволновых радиометров по сравнению с существующими методами;
4. Метод восстановления интенсивности дождя по данным AMSR2, основанный на использовании низкочастотных измерений на каналах C- и X- диапазона, обладающий повышенной точностью в условиях интенсивностей дождя, превышающих 10 мм/ч, по сравнению с альтернативными методами;
5. Метод фильтрации радиочастотных помех в C- и X- диапазоне в районах океана, обеспечивающий возможность исключения из области применения алгоритмов зоны искусственного микроволнового излучения;
6. Метод идентификации полярных циклонов в полях влагозапаса атмосферы, восстановленных по данным измерений AMSR2, позволяющий, в отличие от традиционно используемых измерений, детектировать ПЦ в условиях наличия верхнего яруса облаков.

Достоверность разработанных в работе методов подтверждается их комплексной верификацией, т.е. сравнением результатов применения методов к данным спутниковых измерений с данными независимых контактных измерений параметров океана и атмосферы и альтернативными спутниковыми продуктами для различных состояний системы океан – атмосфера, включая экстремальные. Метод восстановления скорости ветра в тропических циклонах, протестирован с использованием самых точных на сегодняшний день данных о скорости ветра, полученных на основе самолетных измерений в ураганах.

Апробация работы. Весь комплекс созданных методов внедрен в геоинформационную систему, разработанную в Лаборатории Спутниковой Океанографии (ЛСО) РГГМУ, осуществляющую оперативную обработку данных измерений AMSR2. Усилиями сотрудников лаборатории методы доведены до создания готовых спутниковых продуктов, визуализация которых для региона Арктики представлена на Арктическом портале ЛСО. На основании применения метода идентификации ПЦ в полях влагозапаса атмосферы создана новая климатология ПЦ в морях Северо-Европейского бассейна, выявившая существенно большее количество этих опасных явлений, чем считалось ранее. В ЛСО восстановленные поля параметров с успехом применяются в работах, связанных с улучшением качества прогноза эволюции полярных циклонов. Построенные по данным измерений AMSR2 поля ветра, влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и интенсивности осадков для базы тропических циклонов 2012-2015 гг. используются сотрудниками института Ifremer. Алгоритмы восстановления *Q*, *W*, и *V* входят в пакет исследовательских алгоритмов японской службы распространения данных AMSR2 GCOM-W1 Data Providing Service. Большая часть методов оформлена в виде патентов РГГМУ на изобретение.

Основные результаты и выводы, полученные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, представлялись на международных и российских конференциях, симпозиумах и семинарах:

1. Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса» (Москва, Россия, 2004, 2005, 2007, 2008-2010, 2012-

2015);

2. Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (2010, 2014, 2016);
3. GCOM Principal Investigator Workshops (Токио, Япония, 2010, 2012, 2014);
4. International Geoscience and Remote Sensing Symposiums (2008, 2009, 2011, 2014-2016);
5. The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2012) Conference (Нанжинг, Китай, 2012);
6. The Arctic Frontiers conference «Geopolitics and Marine Production in a Changing Arctic» (Тромсе, Норвегия, 2013);
7. Joint EUMETSAT/AMS Satellite Meteorology, Oceanography, and Climatology Conference (Вена, Австрия, 2013);
8. European Polar Low Working Group Polar Low Workshops (2012, 2016);
9. European Geosciences Union General Assemblies (2010, 2012, 2014, 2015);
10. Международный научный семинар «Remote sensing of dangerous events in the ocean-atmosphere system» (Санкт-Петербург, Россия, 2015);
11. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД) (Санкт-Петербург, Россия, 2010, 2012, 2015);
12. Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, Россия 2012, 2014);
13. Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium "A Healthy Ocean for Prosperity in the Western Pacific: Scientific Challenges and Possible Solutions" (Вьетнам, 2014).

Личный вклад автора заключается в разработке всех методов, в постановке цели и задач исследования, их реализации, аналитическом обобщении полученных результатов. Автор разрабатывал все программно-математическое обеспечение для решения всех задач исследования, обрабатывал данные спутниковых и контактных измерений, и проводил все исследования, результаты которых представлены в диссертации.

Соискателем лично написаны все статьи, в которых он является первым автором, и часть статей, опубликованных в соавторстве.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 7-и глав, заключения и списка литературы из 223-х наименований. В ней содержится 241 страница, 6 таблиц и 73 рисунка.

Благодарности. Автор искренне признательна профессору, д. ф.-м. н. Митнику Л.М. за его консультации в ходе многолетних исследований. Автор благодарит французского ученого профессора B. Chapron за научные идеи, советы и рекомендации при подготовке и проведении данной работы. Автор глубоко благодарен всему коллективу Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ, в первую очередь, - ее директору Кудрявцеву В.Н. за постоянную всестороннюю поддержку и помощь в проведении исследований. Автор также благодарен всем коллегам, с которыми проводились совместные исследования – И.А. Гурвич, Л.П. Бобылеву, О.Г. Анискиной, N. Reul.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описана степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы использованная методология и методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Современные методы восстановления параметров океана и атмосферы по данным спутниковой микроволновой радиометрии» приводится аналитический обзор исторических и существующих методов восстановления рассматриваемых параметров океана и атмосферы: скорости приводного ветра, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, интенсивности осадков. Делается вывод, что несмотря на большое количество существующих методов и готовых спутниковых продуктов, в экстремальных погодных условиях, включающих облачность с водозапасом, превышающим 0.5 кг/м^2 и сильные ветры со скоростью больше 15 м/с, они либо не существуют, либо обладают большими погрешностями.

Показано, что на сегодняшний день оценка влагозапаса атмосферы возможна при помощи как наземных измерений радиозондами, так и спутниковых измерений в различных диапазонах электромагнитного спектра. В качестве in-situ данных по Q при валидации спутниковых методов используются измерения Q радиозондами и станциями Global Positioning System (GPS). Для водозапаса облаков данные контактных измерений водности крайне редки, поэтому при валидации методов используются косвенная информация о наличии/отсутствии облачности. На основании анализа особенностей восстановления влагозапаса атмосферы Q и водозапаса облаков W различными спутниковыми инструментами делается вывод, что данные спутниковых микроволновых сканирующих радиометров на сегодняшний день позволяют восстанавливать влагозапас атмосферы над океанами с самой высокой точностью по сравнению с остальными спутниковыми методами во всем диапазоне его изменчивости – от полярных регионов с минимальными значениями $Q < 1$ кг/м^2, до тропических широт с максимальными $Q \sim 70$ - 80 кг/м^2. Однако, в экстремальных условиях точности традиционных методов остаются крайне низкими.

Несмотря на низкое пространственное разрешение, спутниковые микроволновые сканирующие радиометры остаются ценнейшим источником регулярной глобальной информации об интенсивности дождя над океанами в широкой полосе обзора. Однако, современные методы используют измерения на высокочастотных каналах, крайне чувствительные к профилю распределения параметров осадков по высоте, что приводит к большим погрешностями при высоких значениях интенсивности осадков.

В настоящее время данные о приводном ветре получаются на основании измерений приборов с наземных, самолетных и спутниковых платформ. При скоростях ветра от низких до умеренных наиболее точными считаются контактные измерения ветра морскими буями. В условиях высоких скоростей ветра (> 15 м/с) наиболее точными измерениями являются самолетные измерения ветра с помощью сбрасываемых радиозондов и радиометром со ступенчатым изменением частоты. Именно последние используются при верификации спутниковых методов оценки ветра в тропических циклонах. Спутниковые измерения приводного ветра активными и пассивными микроволновыми инструментами, получаемые в широкой полосе обзора, - это единственные измерения, позволяющие строить глобальные карты ветра над Мировым Океаном. При этом ни один из существующих методов не применим в условиях ураганов, поэтому готовые спутниковые продукты по ветру закрыты масками.

В главе 2 «Разработка нейронно-сетевых методов восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным радиометра AMSR2, применимых в условиях без осадков» описан численный эксперимент по замкнутой схеме, позволяющий моделировать спутниковые измерения с аппаратурой конкретного радиометра и разрабатывать методы оценки геофизических параметров на основе модельных значений радиояркостных температур ($T_я$). Моделирование проводилось для параметров японского радиометра AMSR2, измеряющего микроволновое излучение на частотах 6.9, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 и 89 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. При моделировании уходящего микроволнового излучения системы океан-атмосфера использовались модели характеристик взаимодействия излучения со средой, отобранные на основе анализа публикаций последних лет, посвященных данной тематике, и упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения»:

$$\text{«} \cdot \frac{dT_я(h)}{dh} = -\sim_п(h)T_я(h) + \sim_п(h) \cdot T(h) \qquad (1)$$

где « = *cos*¯, ¯ - зенитный угол, *h* – вертикальная координата, *T(h)* – температура атмосферы, а $\sim_п$ - коэффициент поглощения.

В одномерном приближении, учитывая граничные условия на верхней границе атмосферы и на поверхности океана, суммарное восходящее излучение системы будет включать в себя 4 составляющие: восходящее излучение атмосферы $T^{ё}$, нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью океана и ослабленное слоем атмосферы $T^{í}_{отр}$, излучение океана, ослабленное в атмосфере $T_{я\,ок}$ и космическое излучение $T_к$, равное 2.7 K·exp(-2²) (1-¡):

$$T_я = T^{\uparrow} + T^{\downarrow}_{отр} + T_к + T_{я\,ок} \qquad (2)$$

$$T^{\uparrow} = \frac{1}{\mu}\int_{0}^{\infty} T(h)\gamma_{0}(h)\exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_{h}^{\infty}\gamma_{0}(h')dh'\right)dh \qquad (3)$$

$$T_{отр}^{\downarrow} = (1-\kappa)\cdot\exp(-\tau)\cdot\frac{1}{\mu}\int_{0}^{\infty} T(h)\gamma_{o}(h)\exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_{0}^{h}\gamma_{o}(h')dh'\right)dh \qquad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu}\int_{0}^{\infty}\gamma_{o}(h')dh' \qquad (5)$$

$$T_{я\,ок} = \kappa\cdot T_{ок}\cdot\exp(-\tau) \qquad (6)$$

где τ - оптическая толщина атмосферы, κ - коэффициент излучения океана, $T_{ок}$ – температура поверхности океана (ТПО).

При расчете поглощения микроволнового излучения кислородом и водяным паром использовались аппроксимационные методики [*Liebe and Layton*, 1987] и [*Turner et al.*, 2009] соответственно. Коэффициенты ослабления микроволнового излучения жидкокапельной фракцией облаков рассчитывались по методике [*Liebe and Layton*, 1987].

Микроволновое излучение гладкой морской поверхности определяется только температурой и диэлектрической постоянной морской воды, при расчете которой использовалась модель [*Meissner and Wentz*, 2004]. При наличии ветра использовалась эмпирическая модель коэффициента излучения океана, эффективная в условиях штормовых ветров, превышающих 15 м/с, разработанная в институте Ifremer, которая является результатом анализа и обобщения большого массива данных сопутствующих измерений скорости приводного ветра и других параметров океана в ураганах и радиометрических измерений [*Chapron et al.*, 2010].

Для расчета $T_я$. микроволнового излучения использовалась база данных измерений с научно-исследовательских судов погоды, состоящих из данных радиозондирования об атмосферных профилях метеопараметров, скоростей приводного ветра, температуры поверхности океана и наблюдений облачности. Всего около 3000 наборов состояний океан – атмосфера. Наблюдения за облаками позволили на основании сопоставления с профилями относительной влажности воздуха оценить высоты верхней и нижней границ облачности, и, с использованием статистических данных о водности различных типов облачности, построить модельные профили водности в облаках. С использованием измеренных профилей влажности атмосферы и модельных значений водности облаков были проведены расчеты влагозапаса атмосферы Q_0 и водозапаса облаков W_0.

Для решения обратной задачи использовались НС типа многослойный персептрон (МП). Описаны коротко использованные при разработке математические основы МП. Выбор входных параметров НС (обозначим каналы AMSR2 радиометра T06H, T06V, T10H, T10V, T18H, T18V, T23H, T23V, T36H, T36V для измерений на частотах 6.9, 10.65, 18.7, 23.4, 36.5 и 89 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризаций соответственно) определялся анализом чувствительности $T_я$ к Q и W, основанным на результатах модельных расчетов. Схемы оптимальных НС для восстановления Q и W по данным AMSR2 представлены на рисунке 1.

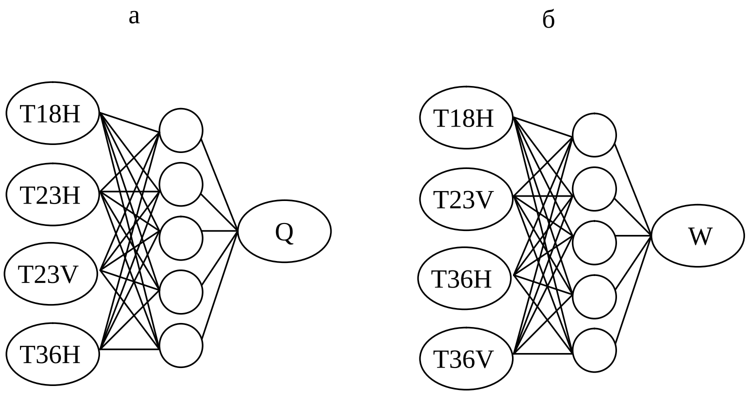

Рисунок 1. Оптимальные конфигурации нейронных сетей, используемые в алгоритмах восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным измерений AMSR2.

При применении алгоритмов к модельным значениям $T_я$ среднеквадратичная ошибка восстановления Q составила 1.0 кг/м^2, а ошибка восстановления W составила 0.05 кг/м^2 для настроечного и тестирующего набора данных.

Диаграмма разброса восстановленных по модельным $T_я$ значений Q' от измеренных Q_0 для тестирующего набора данных показана на рисунке 2(а), а диаграмма разброса водозапаса облаков W', восстановленного по данным AMSR2, от рассчитанных по модельным значениям водности облаков W_0, представлена на рисунке 2(б).

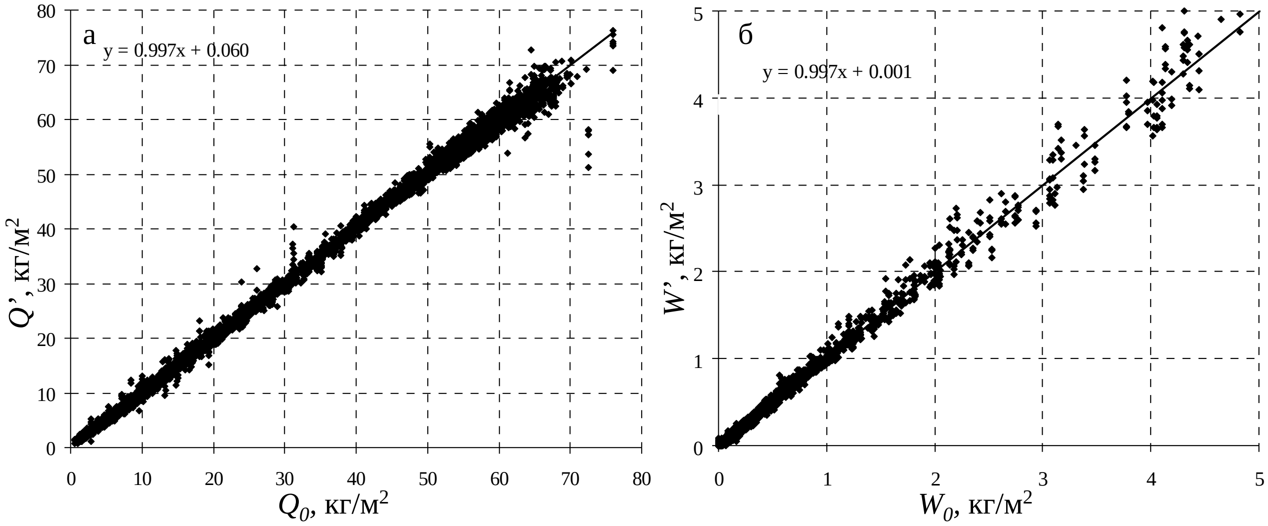

Рисунок 2. (а) Диаграмма разброса влагозапаса атмосферы *Q'*, восстановленного с помощью нейронно-сетевого алгоритма по данным измерений AMSR2, от рассчитанного по измерениям влажности атмосферы Q_0; (б) диаграмма разброса водозапаса облаков *W'*, восстановленного по данным AMSR2, от рассчитанных по модельным значениям водности облаков значений W_0.

Валидация метода восстановления влагозапаса атмосферы проводилась с использованием независимых измерений влажности радиозондами островных станций. Анализ сравнения результатов применения метода (после модельной калибровки, описанной в соответствующем разделе) к измерениям AMSR2 с данными радиозондирования по влагозапасу атмосферы, позволяет сделать вывод, что в тропических районах, характеризующихся высокими значениями *Q* метод обладает погрешностью ~1.14 кг/м^2 (2.3%), а в полярных районах с низкими значениями *Q* (среднее значение *Q*~10.3 кг/м^2), погрешность составляет ~0.68 кг/м^2 (6.6%). Погрешность, рассчитанная с использованием всех данных σ = 1.0 кг/м^2.

Для тестирования метода оценки водозапаса облаков была использована косвенная валидация, основанная на сопоставлении полей водозапаса облаков с инфракрасными и видимыми изображениями AVHRR. На основании ~ 350 построенных полей водозапаса облаков и квази-синхронных изображений AVHRR ИК диапазона был сделан вывод об адекватной диагностике методом облачности, то есть, при отсутствии облаков на снимках AVHRR наблюдались нулевые (±0.05 кг/м^2) значения водозапаса, восстановленного по данным AMSR2.

Поскольку методы разработаны для исследования экстремальных явлений, отдельная валидация метода восстановления влагозапаса была проведена для условий экстремальных ветров в тропических циклонах. Для этого были использованы измерения влагозапаса GPS для специально отобранных случаев прохождения ТЦ над несколькими станциями GPS, когда скорости ветра превышали 15 м/с. Погрешность метода при V > 15 м/с составила 1.7 кг/м^2, в то время как погрешность оперативного спутникового продукта RSS оказалась равной 3.5 кг/м^2, т.е. в два раза выше.

Метод фильтрации оптически плотных атмосфер основан на использовании пороговых значений интегрального атмосферного поглощения на частоте 10.65 ГГц $^{2}{}_{10}$. Интегральное атмосферное поглощение на данной частоте восстанавливается по данным измерений AMSR2 на каналах измерений на частотах 10.65, 18.7 и 23.8 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации. Оптимальная НС состоит из одного скрытого уровня из 5 обрабатывающих нейронов. Абсолютная погрешность восстановления $^{2}{}_{10}$ равна 0.0013.

В настоящее время в спутниковых продуктах ЛСО применяется порог $^{2}{}_{10}$ = 0.08. При значениях водозапаса облаков, ведущих к превышению ^{2} этого порога, высока вероятность образования осадков, поэтому метод можно считать методом фильтрации осадков. Применение данного метода фильтрации оптически плотных атмосфер для более 500 случаев внетропических и полярных циклонов позволило уменьшить маскирование в областях сильных ветров на 20% по сравнению с маской, используемой в RSS, и на 50% по сравнению с маской, используемой в продуктах Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

Метод фильтрации оптически плотных атмосфер, опубликован в статье [*Zabolotskikh et al.*, 2013], а работа по созданию алгоритма оценки влагозапаса атмосферы, принята к печати в журнале «Физика атмосферы и океана. Известия РАН» [Заболотских и Шапрон, 2016а].

В главе 3 «Калибровка радиояркостных температур спутниковых микроволновых радиометров» проводится модельная калибровка - выполнение расчетов $T_я$ с использованием известных значений параметров океана и атмосферы и сравнение результатов расчетов с совмещенными в пространстве и во времени спутниковыми измерениями [*Wentz and Meissner*, 2000]. Модельная калибровка выполнена для корректировки данных измерений радиометров DMSP F16 SSMIS, Aqua AMSR-E и GCOM-W1 AMSR2.

Систематические ошибки между измерениями и расчетами $T_я$ могут являться следствием как неточной инструментальной калибровки, так и неадекватности используемой модели радиационного переноса [*Turner*, 2004]. В работе проводится выбор комбинации моделей атмосферного поглощения и излучения океана, обеспечивающей наилучшее воспроизведение измеренных радиометрами AMSR-E и F16 SSMIS $T_я$, а также расчет калибровочных поправок к модельным значениям $T_я$, учитывающих суммарно как неопределенности геофизической модели, так и неточности инструментальной калибровки.

Были протестированы комбинации моделей, состоящие из 4-х моделей поглощения водяного пара, 2-х моделей поглощения кислорода и 2-х моделей ветровой зависимости коэффициента излучения океана. Тестирование проводилось путем сравнения расчетных значений $T_я$ с с сопутствующими спутниковыми измерениями. Использовалась база данных измерений, отобранных для безоблачных ситуаций. Подробно описаны создание такой базы и требования к данным наземных и спутниковых измерений, поскольку от выполнения этих требований зависит возможность использовать эти данные для сопоставления. В результате проведенного сравнения была выбрана комбинация моделей, обеспечивающая наилучшее в смысле среднеквадратичной разницы соответствие между рассчитанными и измеренными значениями $T_я$. Путем усреднения разностей между модельными и измеренными значениями радиояркостных температур были получены калибровочные поправки к $T_я$. Добавление найденных поправок дает возможность использовать модельные значения $T_я$ для разработки алгоритмов оценок геофизических параметров, и обеспечивает однородность рядов данных параметров независимо от типа используемого инструмента [*Dee*, 2005]. Полученные поправки следует применять лишь над районами океанов, свободными ото льда. Схемы коррекции радиояркостных температур, применимые во всем диапазоне наблюдаемых значений, требуют нелинейного и существенно более сложного подхода [*Auligné et al.*, 2007].

Данная работа опубликована в двух русскоязычных статьях [Заболотских др., 2012а,б] и в статье [*Zabolotskikh et al.*, 2014a]

В главе 4 «Разработка метода восстановления интенсивности дождя по данным AMSR2» приводится описание метода восстановления интенсивности дождя по данным измерений AMSR2, основанного на использовании низкочастотных измерений радиометра на каналах С- и Х- диапазона. На этих частотах существенное влияние на $T_я$ оказывают параметры океана, в частности, скорость приводного ветра. Для уменьшения влияния на работу алгоритма других параметров океана используются разницы в измерениях на каналах С- и Х-диапазона.

Алгоритм основан на результатах физического моделирования радиояркостной температуры уходящего излучения над океаном в условиях дождя для характеристик низкочастотных каналов AMSR2 С- и Х - диапазона. Обратная задача решается с использованием НС. Валидация проводится путем сопоставления результатов применения алгоритма к данным AMSR2 уровня Level 1B с готовым спутниковым продуктом по интенсивности дождя, полученным в RSS и основанным на данных TRMM TMI.

Численное моделирование $T_я$ выполнено с использованием параметризации [*Liebe and Layton*, 1987] для расчета показателей ослабления микроволнового излучения гидрометеорами облаков и осадков. Использовалась упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения, при которой в уравнении в приближении «чистого поглощения» (1) $\sim_n$ заменяется на коэффициент ослабления $\sim_o$, представляющий из себя сумму $\sim_n$ и коэффициента рассеяния $\sim_p$. Жидкие осадки моделировались с постоянной интенсивностью в пределах толщины атмосферы от поверхности Земли до уровня нулевой изотермы, определяемого по аэрологическим данным о температуре воздуха. В качестве входных параметров НС для оценки интенсивности дождя R по данным измерений AMSR2 были использованы разницы в измерениях - дифференциальные $T_я$. Они зависят, главным образом, от интенсивности дождя и существенно меньше зависят от параметров океана, чем сами измерения.

Наилучшие результаты (с наименьшей ошибкой) обеспечивались при использовании НС со скрытым уровнем, состоящим из 15 обрабатывающих нейронов.

При ее применении к модельным значениям разностей $T_я$ ошибка восстановления R в рамках численного эксперимента составила 1.5 мм/ч.

Валидация метода проводилась на основании сравнения результатов применения алгоритма к данным радиометра AMSR2 с готовым спутниковым продуктом по интенсивности дождя, основанным на использовании данных пассивного микроволнового инструмента TMI с платформы TRMM. Эти данные считаются одними из самых надежных, поскольку они калиброваны на измерения микроволнового радара с этой же самой платформы. Общая погрешность, рассчитанная как среднеквадратичное отклонение R_{AMSR2} от R_{TMI} для всего набора данных, составила $\sigma = 1$ мм/ч, что на 15% ниже, чем при использовании стандартного продукта RSS.

Разработанный алгоритм применим для восстановления интенсивностей дождя до 20 мм/ч. При этом, для интенсивных дождей ($R > 10$ мм/ч) его следует использовать с аккуратностью, принимая во внимание ограничения и упрощения модели, проблемы пространственного усреднения данных пассивных микроволновых инструментов и не учет при моделировании ряда физических факторов, существенных при дождях высокой интенсивности.

Данная работа опубликована в статьях [*Заболотских и Шапрон*, 2016б] и [Zabolotskikh, Chapron, 2015в].

В главе 5 «Разработка метода восстановления скорости приводного ветра в условиях интенсивных осадков в тропических циклонах по данным AMSR2» содержится описание решения ключевой задачи работы – создания алгоритма восстановления скорости приводного ветра V по данным измерений AMSR2.

Вначале был разработан алгоритм оценки V для условий без осадков. Для этого использовался численный эксперимент, подробное описание которого дано во второй главе. Для условий без осадков для восстановления скорости приводного ветра было настроено две НС – одна с использованием каналов на частотах 6.9 и 10.65 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации, вторая – с использованием каналов на частотах 18.7, 23.8 и 36.5 ГГц, только горизонтальной поляризации. Теоретические погрешности методов - $\sigma_V^1 = 0.9$ м/с для низкочастотного (НЧ), $\sigma_V^2 = 1.8$ м/с для высокочастотного (ВЧ) алгоритма. ВЧ алгоритм применим только для условий нерассеивающей атмосферы без осадков. Конфигурации НС для НЧ и ВЧ алгоритмов восстановления скорости приводного ветра по данным измерений AMSR2 представлены на рисунке 3.

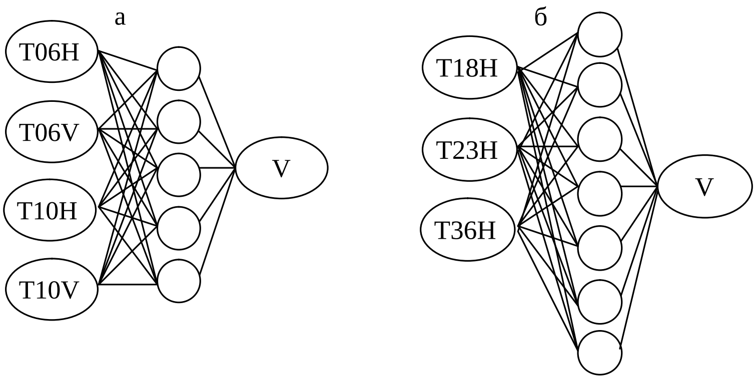

Рисунок 3. Конфигурации НС, используемые в алгоритмах восстановления приводного ветра по данным измерений AMSR-E, AMSR2 (а) при оптически плотной атмосфере ($^{2}{}_{10}$ > 0.08) – НЧ алгоритм; (б) при оптически прозрачной атмосфере ($^{2}{}_{10}$ < 0.08) - ВЧ алгоритм.

Валидация для условий умеренных ветров проводилась для радиометра AMSR-E на основе данных морских буев. Была использована база данных сопутствующих измерений AMSR-E и измерений буев, предоставленных JAXA (около 55000 сопутствующих измерений). Тестирование показало, что НЧ алгоритм, обладает в 2 раза более высокой точностью оценок скорости приводного ветра (σ_V^1 = 1.27 м/с), чем ВЧ алгоритм (σ_V^2 = 2.5 м/с). В северных широтах погрешность ВЧ алгоритма ниже, чем в тропических, а для НЧ алгоритма, наоборот, выше. Поэтому в условиях оптически прозрачных атмосфер северных широт с низкими значениями влаго- и водозапаса использование ВЧ алгоритма предпочтительнее, учитывая его более высокое разрешение.

Для условий сильных ветров (V > 15 м/с), валидация была проведена для радиометра AMSR2 и данных измерений ветра с нефтяных платформ. По результатам сопоставления с данным измерений ветра с платформ погрешность восстановления V ВЧ алгоритмом $\sigma_{ВЧ}$ = 1.6 м/с, низкочастотным алгоритмом $\sigma_{НЧ}$ = 1.4 м/с. ВЧ алгоритм существенно занижает ветер в области сильных ветров.

Было также проведено сравнение результатов применения алгоритмов с ветром по данным Metop-A ASCAT для ВЦ Северной Атлантики. Результаты сравнения *V*, восстановленной по данным AMSR2 с помощью НЧ и ВЧ алгоритмов, с ветром по данным ASCAT в пределах 15-минутной разницы во времени, представлены на рисунке 4.

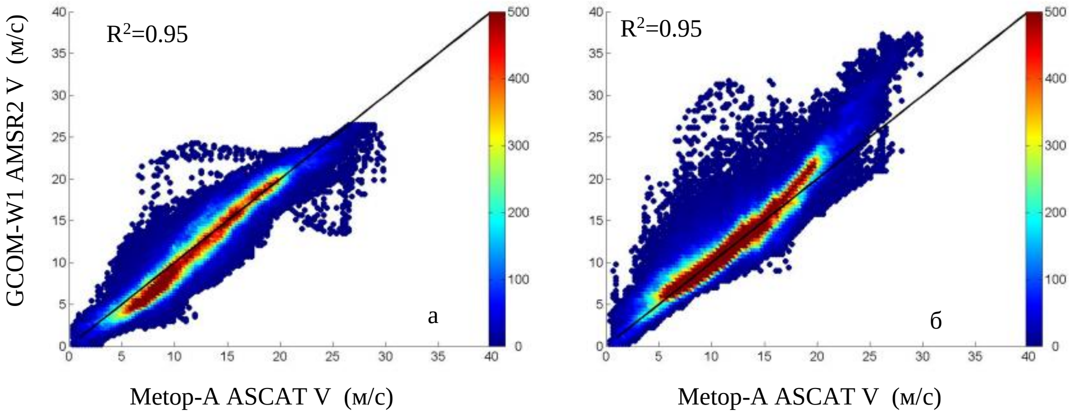

Рисунок 4. Диаграмма разброса скоростей ветра, восстановленных по данным AMSR2, от скоростей ветра по данным ASCAT: (а) – ВЧ алгоритм; (б) – НЧ алгоритм. Цветовая шкала представляет количество данных в соответствующем диапазоне скоростей ветра.

Завышение *V* НЧ алгоритмом в области ветров с *V* > 15 м/с относительно данных ASCAT свидетельствует о недооценке сильных ветров скаттерометром [*Quilfen et al*., 2007] и косвенно подтверждает более корректную работу НЧ алгоритма оценки ветра при экстремальных ветрах.

Результаты работы по созданию и валидации алгоритмов восстановления скорости приводного ветра в условиях без осадков, опубликованы в [*Zabolotskikh et al.*, 2014б]

Данные измерений микроволновых радиометров, принимающих излучение на частотах С- и Х- диапазона, можно использовать для восстановления свойств поверхности в условиях осадков, поскольку насыщение сигнала отсутствует вплоть до интенсивностей *R*~ 20 – 30 мм/ч. Такими каналами обладают радиометры WindSat, AMSR2 и AMSR-E. В основе метода восстановления скорости приводного ветра в ТЦ по данным измерений AMSR2 лежит разделение общего регистрируемого излучения на излучение слоя осадков (дождя) с радиояркостной температурой T_R и излучение системы океан-атмосфера без осадков и применении к последнему разработанного НЧ алгоритма. Метод выделения T_R из общей $T_я$ основан на анализе полей $T_я$ над ТЦ. Для анализа использовались такие ТЦ, над центральной частью которых на равном расстоянии от центра имелись и безоблачные области, и области интенсивных осадков. После вычитания T_R из $T_я$ к результирующему остатку, который представляет собой излучение системы океан-атмосфера без дождя, применяется НЧ алгоритм восстановления скорости приводного ветра.

Валидация метода восстановления ветра в ТЦ по данным AMSR2 проводилась на основании самолетных измерений ветра радиометром SFMR в ураганах Sandy 29 октября 2012 и Edouard 15 сентября 2014. Поля восстановленных скоростей ветра для данных ураганов с наложенными траекториями движения ТЦ представлены на рисунке 5.

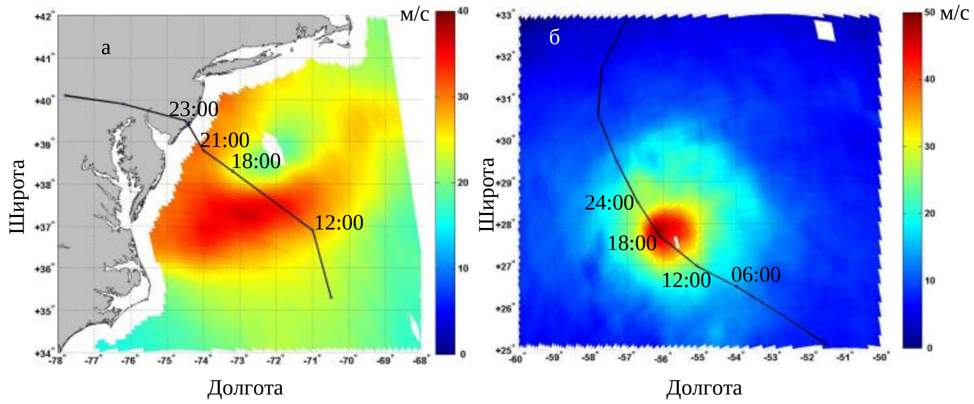

Рисунок 5. Поля скорости ветра, восстановленные по данным AMSR2 (а) в урагане Sandy 29 октября 2012 в ~18:15 Гр.; (б) в урагане Edouard 15 сентября 2014 в ~16:45 Гр. Черные линии обозначают траектории движения ураганов.

Среднеквадратичная ошибка между измерениями ветра SFMR и AMSR2 в пределах получасовой разницы во времени измерений составила σ = 1.2 м/с. Метод восстановления скорости приводного ветра в тропических циклонах опубликован в статье [*Zabolotskikh et al.*, 2015a].

С использованием данного метода построены поля ветра для базы данных тропических циклонов 2012-2015 гг. Проанализированы результаты сопоставления полей ветра, восстановленных по данным AMSR2 с полями ветра по данным SMOS.

Скорости ветра в области ураганных ветров (>33 м/с) коррелируют с коэффициентом корреляции ~ 0.9. Данное исследование вошло в публикацию [*Reul et al.*, 2016]

Метод идентификации зон радиочастотных помех (RFI от английского Radio Frequency Interference) основан на определении функций $T_я$, пороговые значения которых можно использовать для диагностики RFI. Основой метода является существенная корреляция между спектральными разницами измерений $T_я$, характерная для микроволнового излучения системы океан – атмосфера во всем диапазоне естественной изменчивости параметров океана и атмосферы. Схема принятия решения о наличии или отсутствии RFI на каналах измерений на частотах 6.9, 7.3 и 10.65 ГГц представлена на рисунке 6. Пороговые значения a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, для функций спектральных разностей в измерениях определены на основании физического моделирования.

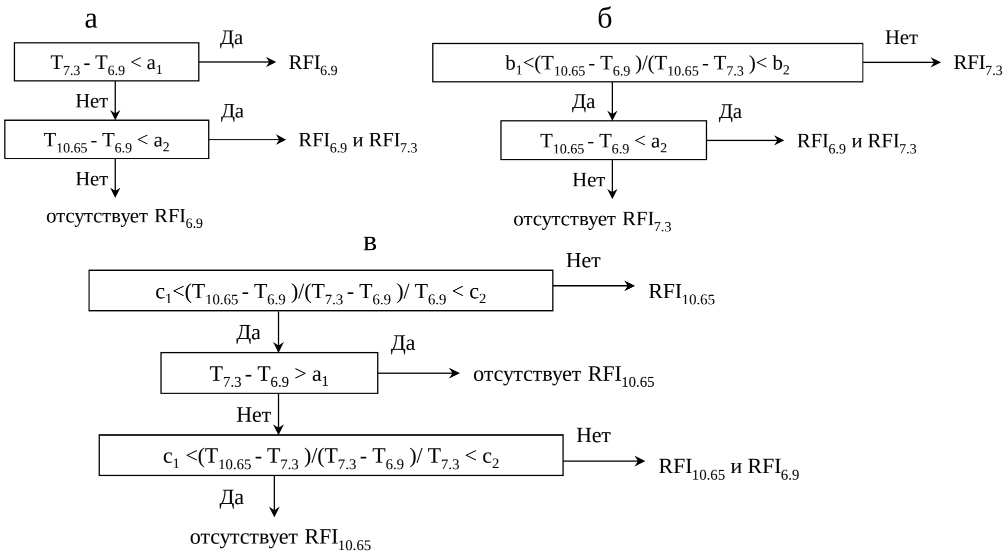

Рисунок 6. Схема принятия решения о наличии или отсутствии RFI на каналах измерений на частотах 6.9 ГГц (а), 7.3 ГГц (б) и 10.65 ГГц (в).

Метод идентификации зон RFI опубликован в статье [*Zabolotskikh et al.*, 2015б]

В главе 6 «Разработка геофизической модельной функции микроволнового излучения океана в ураганах в С-диапазоне» описывается подход, направленный на уточнение функциональной зависимости микроволнового излучения океана от скорости ветра (геофизической модельной функции) при ветрах, превышающих 33 м/с, основанный на физическом моделировании $T_я$ и анализе базы данных измерений AMSR2 и скоростей ветра по данным Best Track для тропических циклонов 2012 – 2015 гг.

Большинство эмпирических ГМФ используют измерения микроволнового излучения вблизи поверхности океана для исключения влияния атмосферы. В данной работе для уточнения поведения ГМФ в области ураганных ветров использовались результаты численного моделирования $T_я$ уходящего излучения системы океан-атмосфера с осадками и анализ полей измеренных радиометром AMSR2 значений $T_я$. Суть подхода заключается в извлечении из общей измеренной $T_я$ системы океан-атмосфера микроволнового излучения океана.

После ряда допущений решение уравнения (1) в главе 2 может быть представлено как:

$$T_B \approx T_{eff}\cdot\tau + T_{eff}\cdot\tau\cdot(1-\varepsilon)\cdot(1-\tau) + T_S\cdot\varepsilon\cdot(1-\tau), \qquad (7)$$

где $T_B = T_я$ – радиояркостная температура уходящего излучения системы океан - атмосфера, T_{eff} – эффективная температура атмосферы, T_s = $T_{ок}$ – температура поверхности океана. Из уравнения (7) следует, что коэффициент излучения океана ε - может быть представлен как:

$$\varepsilon \approx \frac{T_B - T_{eff}\cdot\tau\cdot(2-\tau)}{(T_S - T_{eff}\cdot\tau)\cdot(1-\tau)}. \qquad (8)$$

Таким образом, зная T_B, T_S, τ и T_{eff}, можно рассчитать ε и параметризовать его как функцию скорости ветра V в ураганных условиях. Использовались данные по скорости ветра в ТЦ из архивов Best Track. Атмосферное поглощение рассчитывалось с использованием метода, описанного в [*Zabolotskikh et al.*, 2013], а эффективная температура атмосферы T_{eff} считалась равной 260K (обобщение результатов численного моделирования).

В качестве данных по температуре океана были использованы ежедневные данные RSS. τ_0 – атмосферное поглощение для атмосферы без осадков, T_R – радиояркостная температура дождя, параметризация которой с использованием измерений AMSR2, описана в главе 5.

База данных измерений радиометров для условий ураганных ветров состояла из ~600 сопряженных по времени пересечений траекторий движения 177 тропических циклонов измерениями AMSR2 за период 2012 – 2015 годы и Best Track.

На основании анализа рассчитанных значений излучения океана у поверхности и данных по максимальной скорости ветра из центров данных ураганов были построены зависимости ¡*(V)* на горизонтальной и вертикальной поляризации. Данные зависимости представлены на рисунке 7.

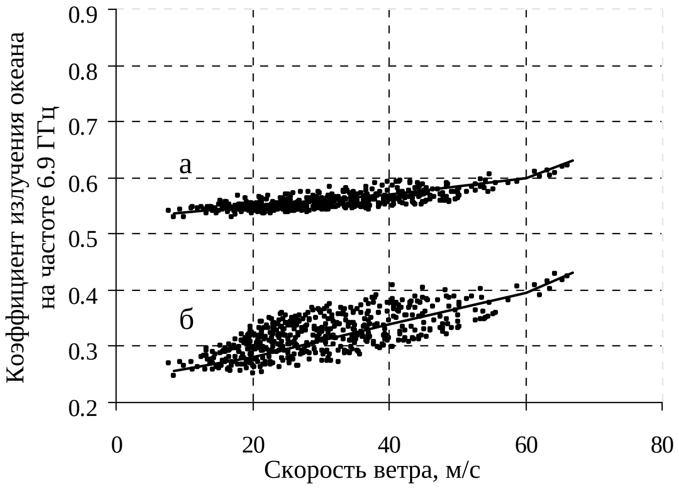

Рисунок 7 Максимальные значения коэффициента микроволнового излучения океана ¡ě на частоте 6.9 ГГц: (а) – на вертикальной поляризации, (б) – на горизонтальной поляризации как функции 10-минутной скорости ветра в ураганах по данным Best Track.

Разброс данных достаточно большой, что обусловлено большим количеством допущений и приближений, использованных при моделировании. Формулировка полученной ГМФ в виде кусочно-линейной функции:

$$¡^{V,H} = a_i^{V,H} \cdot V \quad , \qquad (9)$$

где $a_i^{V,H}$ – коэффициенты линейной регрессии (таблица 1).

Таблица 1. Коэффициенты линейной регрессии для ГМФ микроволнового излучения океана в ураганах в С-диапазоне.

Диапазон скоростей ветра *i*	*V*, м/с	$a_i^{,H}$, K/(м/с)	a_i^V, K/(м/с)
1	< 15	0.4	0.2
2	15 - 20	0.6	0.3
3	20 - 40	0.8	0.4
4	40 - 60	1.0	0.5
5	> 60	1.5	1.3

Уточнение ГМФ в диапазоне скоростей ветра, превышающих 60 м/с, требует продолжения работы в данном направлении. Новая ГМФ опубликована в [*Zabolotskikh et al.*, 2016a]

В главе 7 «Идентификация полярных циклонов на основе использования данных спутниковой микроволновой радиометрии» описывается применение разработанных методов для изучения полярных циклонов. Полярные циклоны представляют собой коротко живущие атмосферные явления мезо-масштаба и относятся к чрезвычайно опасным явлениям, связанным с развитием ураганных ветров и высокого волнения. На сегодняшний день мировой наукой не решена не только задача прогнозирования зарождения ПЦ, но и задача их безошибочного детектирования. Одна из причин проблем с обнаружением ПЦ при помощи традиционных спутниковых данных (измерений в видимом и ИК спектра) связана с тем, что облачность ПЦ развивается в приземном слое, и при наличии верхнего слоя облаков облачный вихрь ПЦ не диагностируется.

Метод обнаружения ПЦ в полях влагозапаса атмосферы позволяет идентифицировать ПЦ независимо от облачности, поскольку наибольший вклад в *Q* вносит именно влажность приземного слоя. Использование измерений AMSR2 для идентификации ПЦ имеет дополнительное преимущество: поиск вихревых структур в полях влагозапаса проводится одновременно с анализом восстановленных скоростей ветра, что позволяет выделить те мезоциклоны, в которых *V* превышает пороговое значение. Рисунок 8, на котором представлены поля *Q*, восстановленные по данным GCOM-W1 AMSR2, и видимое изображение облачности Aqua MODIS, иллюстрирует случай ПЦ, закрытого верхней облачностью. Разница в измерениях составляет несколько минут.

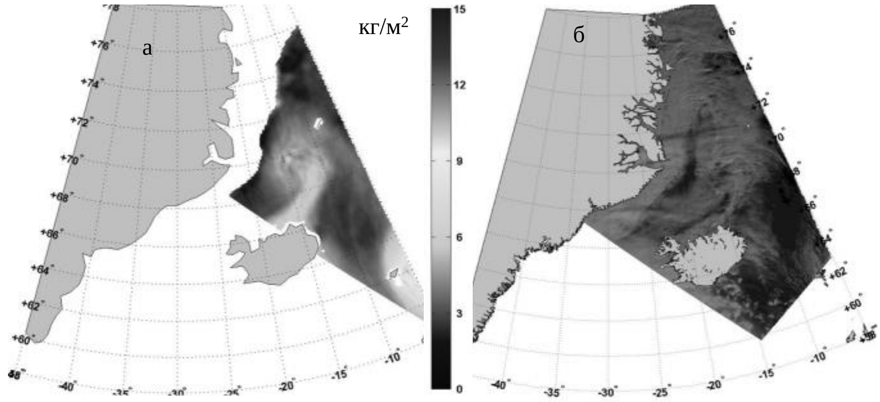

Рисунок 8. Полярный циклон в Гренландском море 23 марта 2014 г.: (а) поле влагозапаса атмосферы *Q*, восстановленное по данным GCOM-W1 AMSR2, (б) снимок Aqua MODIS в видимом диапазоне. Время измерений ~ 12:00 Гр.

Метод обнаружения ПЦ в полях *Q*, без привлечения дополнительных данных более высокого пространственного разрешения, верифицирован на основании детального изучения более 140 ПЦ. В процессе верификации использовался синергетический анализ данных мультисенсорного зондирования: микроволновых радиометров DMSP SSM/I, Aqua AMSR-E, GCOM-W1 AMSR2 (поля *Q*, *W*, *V*), скаттерометров QuikSCAT, Metop-A, B ASCAT (дополнительные поля *V*), спектрорадиометров NOAA AVHRR, Terra и Aqua MODIS (проявление ПЦ в полях облачности), радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) Envisat ASAR, Sentinel 1 (поля ветра высокого разрешения).

При использовании метода идентификации ПЦ в полях влагозапаса атмосферы *Q* точность восстановления *Q* имеет первостепенное значение, поскольку вариации *Q* в циклоне составляют порядка 2-3 кг/м^2. Если погрешность оценки *Q* такого же порядка, диагностика ПЦ невозможна. Метод опубликован в статье [*Bobylev et al.*, 2011] и в главе в монографии [*Zabolotskikh et al.*, 2012]. С использованием данного метода была создана новая статистика ПЦ в морях Северо-Европейского бассейна за период с 1995 по 2009 г. [*Smirnova et al.*, 2015]. Отличительной чертой новой статистики является бóльшее количество ПЦ, чем указано в опубликованной литературе, что, очевидно, является следствием обнаружения ПЦ под верхней облачностью.

Глобальное потепление климата Арктики привело к увеличению морских пространств, свободных ото льда, и, как следствие, к появлению ПЦ там, где они никогда не встречались ранее. На основе применения метода идентификации ПЦ были обнаружены мезомасштабные циклоны (МЦ) в морях российского (восточного) сектора Арктики. Детальное рассмотрение МЦ позволило определить типичные условия их формирования и выявить общие закономерности развития. Комплексный анализ спутниковых данных и термобарических полей тропосферы для более 150 ПЦ позволил сделать вывод, что в восточном секторе Арктики ПЦ в основном образуются вблизи кромки льда или в центральной части старых окклюдированных циклонов, а при благоприятных синоптических ситуациях и под влиянием орографии - вблизи островов и побережья материка, и развиваются на фоне более слабых потоков тепла от морской поверхности и при более устойчивой стратификации атмосферы, чем в других регионах мезомасштабного циклогенеза.

Данная работа опубликована в статьях [*Заболотских и др.*, 2016,] и [*Zabolotskikh et al.*, 2016б].

В заключении сформулированы основные результаты работы, заключающиеся в разработке новых методов восстановления параметров океана и атмосферы, эффективных в условиях экстремальных условий (штормовые ветра, облачный покров, ливневые осадки) и предназначенных для исследования таких опасных явлений как тропические, внетропические и полярные циклоны. Эффективность методов была всесторонне верифицирована путем сравнения результатов применения методов к данным AMSR2 с данными независимых измерений параметров. Использование при моделировании современных моделей взаимодействия излучения со средой, применимых в экстремальных условиях, позволило настроить НС алгоритмы восстановления влагозапаса атмосферы Q, водозапаса облаков W, интенсивности осадков R, общего атмосферного поглощения τ и скорости приводного ветра V и обосновать расширенный диапазон применения методов. Проведение модельной калибровки измерений AMSR2 дает возможность применять разработанные методы к спутниковым измерениям и получать новые спутниковые продукты по Q, W, R, и V.

Методы восстановления Q и W разработаны для условий без рассеяния, т.е. применимы над морскими поверхностями, свободными от морского льда при отсутствии осадков, но с облачностью любого водозапаса. Фильтрация осадков производится на основании использования пороговых значений τ на частоте 10.65 ГГц. Погрешность восстановления σ_Q = 1 кг/м^2 оценена на основании данных измерений р/з. Отдельная валидация для экстремальных условий в тропических циклонах, сопровождающихся ветрами с V > 15 м/с, проведенная на основании измерений Q станциями GPS, привела к погрешности σ_Q = 1.7 кг/м^2, что в 2 раза ниже, чем погрешность альтернативного спутникового продукта по Q из RSS.

Метод фильтрации осадков, основанный на расчете τ на частоте 10.65 ГГц, позволил уменьшить маскирование в областях сильных ветров на 20% по сравнению с маской, используемой в RSS, и на 50% по сравнению с маской, используемой в JAXA. Оценка расширения области применения методов сделана на основании использования более 500 случаев пересечений внетропических и полярных циклонов измерениями AMSR2.

Для метода восстановления интенсивности дождя R проведена валидация с использованием альтернативного спутникового продукта по R из RSS, основанного на измерениях TMI, продемонстрировавшая точность на 15% выше, чем у альтернативного спутникового продукта AMSR2 RSS. Метод применим для восстановления R до 20 мм/ч.

Для восстановления скорости приводного ветра V по данным измерений AMSR2 создано два алгоритма. Первый – высокочастотный (ВЧ) алгоритм оценки V – применим в условиях оптически прозрачных атмосфер без осадков. Второй алгоритм - НЧ алгоритм оценки V – основан на использовании измерений каналов радиометра в С- и Х-диапазоне и применим во всех условиях, включая экстремальные условия тропических циклонов. Точность ВЧ алгоритма ($\sigma_{ВЧ}$ = 2.5 м/с), оцененная на основании данных измерений морских буев для обычных, не экстремальных условий, в 2 раза ниже, чем точность НЧ алгоритма ($\sigma_{НЧ}$ = 1.27 м/с).

По результатам сопоставления с данным измерений ветра с нефтяных платформ для условий сильных ветров (V > 15 м/с) погрешность восстановления V ВЧ алгоритмом $\sigma_{ВЧ}$ = 1.6 м/с, низкочастотным алгоритмом $\sigma_{НЧ}$ = 1.4 м/с. ВЧ алгоритм существенно занижает ветер в области сильных ветров.

Возможность применения НЧ алгоритма восстановления ветра в тропических циклонах связана с реализацией разделения общего регистрируемого AMSR2 излучения на излучение слоя осадков T_R и излучение системы океан-атмосфера без осадков и применении к последнему НЧ алгоритма. Метод выделения T_R из общей $T_я$ основан на анализе полей $T_я$ над ТЦ и параметризации T_R в терминах разностей измерений в каналах 6.9, 7.3 и 10.65 ГГц вертикальной поляризации. Валидация метода восстановления ветра в ТЦ по данным AMSR2, проведенная на основании самолетных измерений ветра радиометром SFMR, продемонстрировала высокую точность метода: среднеквадратичная разница между измерениями ветра SFMR и AMSR2 в пределах получасовой разницы во времени измерений составила $\sigma = 1.2$ м/с, включая области экстрмеальных ветров с $V \sim 45$ м/с.

С использованием данного метода построены поля ветра для базы данных тропических циклонов 2012-2015 гг. Проанализированы результаты сопоставления полей ветра, восстановленных по данным AMSR2 с полями ветра по данным SMOS. Скорости ветра в области ураганных ветров (>33 м/с) коррелируют с коэффициентом корреляции ~ 0.9.

Метод идентификации зон RFI на каналах измерений C- и X-диапазона основан на корреляции между измерениями $T_я$ на разных частотах, характерной для микроволнового излучения системы океан – атмосфера во всем диапазоне естественной изменчивости параметров. Его применение необходимо перед применением НЧ алгоритма восстановления скорости приводного ветра и метода восстановления интенсивности осадков для того, чтобы избежать получения ошибочных значений параметров в зонах RFI.

Численное моделирование $T_я$ уходящего излучения системы океан-атмосфера с осадками на частоте 6.9 ГГц и анализ полей измеренных радиометром AMSR2 значений $T_я$. для базы данных тропических циклонов, состоящей из ~600 сопряженных по времени пересечений траекторий движения 177 ТЦ измерениями AMSR2 за период 2012 – 2015 годы и Best Track данных по максимальным скоростям ветра в циклонах, позволил уточнить ГМФ в области ураганных ветров ($V > 33$ м/с). Сравнение рассчитанных с применением новой ГМФ значений микроволнового излучения океана с рассчитанными по старой модели позволяет сделать вывод, что при ветрах со скоростями выше 33 м/с воспроизводство зависимости микроволнового излучения океана от скорости приводного ветра на 28% точнее, чем при ранее использованной ГМФ.

Разработанные методы восстановления параметров океана и атмосферы, эффективные в экстремальных погодных явлениях, были применены для изучения ПЦ. Метод обнаружения ПЦ в полях влагозапаса атмосферы *Q*, восстановленных по данным спутниковых микроволновых радиометров, позволяет идентифицировать ПЦ независимо от облачности. Использование измерений AMSR2 для идентификации ПЦ имеет дополнительное преимущество одновременного анализа полей влагозапаса и ветра, что позволяет выделить те мезоциклоны, в которых *V* превышает 15 м/с. Метод верифицирован с использованием синергетического анализа данных спутниковых радиолокаторов, скаттерометров, спектральных радиометров, данных наземных измерений, карт приземного анализа и реанализа для ~ 140 случаев полярных циклонов.

Метод идентификации ПЦ был использован для обнаружения ПЦ над морями восточного сектора российской Арктики – Восточно-Сибирским морем, Чукотским морем, морем Лаптевых и Карским морем. Комплексный анализ спутниковых данных и термобарических полей тропосферы для более 150 ПЦ выявил наличие мезоциклонической деятельности над морями восточного сектора Арктики, примерные районы распространения и синоптические условия их возникновения и развития. Было обнаружено, что восточноарктические ПЦ в основном образуются вблизи кромки льда или в центральной части старых окклюдированных циклонов, а при благоприятных синоптических ситуациях и под влиянием орографии - вблизи островов и побережья материка, и развиваются на фоне более слабых потоков тепла от морской поверхности и при более устойчивой стратификации атмосферы, чем в других регионах мезомасштабного циклогенеза.

Весь комплекс созданных методов представляет собой мощный инструмент для изучения экстремальных явлений, который может быть использован при решении самых разных задач, в том числе, при моделировании эволюции ТЦ и ПЦ, изучении климата, в оперативном прогнозировании и т.д.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Zabolotskikh E. V., Reul N., Chapron B. (2016a) Geophysical Model Function for the AMSR2 C-Band Wind Excess Emissivity at High Winds // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. - 2016. - Vol. 13, P. 78-81. - doi:10.1109/ LGRS.2015.

2497463
2. Заболотских Е.В., Шапрон Б. (2016а). Восстановление интегральной влажности атмосферы над океанами по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана (принята в печать).
3. Заболотских Е.В., Шапрон Б. (2016б) Нейронно-сетевой метод оценки интенсивности дождя над океанами по данным измерений спутникового радиометра AMSR2 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2016. - №1. - С. 82-88.
4. Zabolotskikh E.V., Gurvich I., Chapron B. (2016б) Polar lows over the Eastern part of the Eurasian Arctic: the sea-ice retreat consequence // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. - 2016. - doi: 10.1109/LGRS.2016.2593487.
5. Заболотских Е.В. (2016) Современные методы определения интегральных параметров влагосодержания атмосферы - влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана (принята в печать).
6. Reul N., Chapron B., Zabolotskikh E., Donlon C., Quilfen Y., Guimbard S., Piolle J.-F. (2016), A revised L-band radio-brightness sensitivity to extreme winds under Tropical Cyclones: the five year SMOS-storm database // Remote Sensing of Environment. - 2016. - Vol. 180. - P. 274–291.
7. Смирнова Ю.Е., Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Шапрон Б. (2016) Статистические характеристики полярных циклонов в морях северо-европейского бассейна по данным спутниковых микроволновых радиометров // Исследование Земли из космоса. - 2016. - № 3. - С. 27 – 36.
8. Анискина О.Г., Заболотских Е.В., Шапрон Б. (2016) Моделирование эволюции полярных циклонов с использованием данных спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3, С. 13-26.
9. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Reul N., Chapron B. (2015a) New Possibilities for Geophysical Parameter Retrievals Opened by GCOM-W1 AMSR2 // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. - 2015. - Vol. 8. - P. 4248 – 4261.
10. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. (2015б) Radio-Frequency Interference Identification Over Oceans for C-and X-Band AMSR2 Channels // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. - 2015. - Vol. 12. - P. 1705–1709.
11. Zabolotskikh E.V. Chapron B. (2015в) Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product // Advances in

Meteorology. - 2015. - doi:10.1155/2015/492603
12. Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B. (2015) Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // Geophysical Research Letters. - 2015. - Vol. 42. - P. 5603 – 5609.
13. Чечин Д.Г., Заболотских Е.В., Репина И.А., Шапрон Б. (2015) Влияние бароклинности в атмосферном пограничном слое и экмановского трения на приземную скорость ветра во время холодных вторжений в Арктике // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2015. - № 2. - С. 146-157.
14. Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. (2015) Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледяного покрова // Исследование Земли из космоса. - 2015. - № 2. - С. 64 – 77.
15. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. (2014a) An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans // Remote Sensing. - 2014. - Vol. 6. - P. 2317–2342.
16. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. (2014б) GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-A ASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic // Remote Sensing of Environment. - 2014. - Vol. 147. - P. 89–98.
17. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. (2013) New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophysical Research Letters. - 2013. - Vol. 40. - P. 3347–3350.
18. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Bobylev L.P., Chapron B. (2012). Satellite passive and active microwave methods for Arctic cyclone studies. Chapter in the book “Typhoon Impacts and Crisis Management”, (editors Danling Tang and Guangjun Sui). - 2012. - Springer Press, - 581P.
19. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б., Анискина О.Г., Дикинис А.В., Смирнова Ю.Е. (2013а) Валидация модели переноса излучения на частотах микроволновых радиометров SSMIS и AMSR-E и её применение при анализе морских погодных систем с использованием усовершенствованных алгоритмов // Ученые записки РГГМУ. - 2013. - № 29. - С.146 – 160.
20. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б., Анискина О.Г., Смирнова Ю.Е., Дикинис А.В. (2013б) Улучшенные модели поглощения атмосферы и излучения океана в диапазоне 5-100 ГГц для расчёта яркостных температур системы океан-атмосфера // Ученые записки РГГМУ. - 2013. - № 29. - С.169 – 182.

21. Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L. (2011) Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - 2011. - Vol. 49. - P. 3302–3310.
22. Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В. (2011) Использование данных реанализа и спутниковых измерений для оценки количественных характеристик штормовых мезоциклонов // Ученые записки РГГМУ. - 2011. - № 22. - С. 157-170.
23. Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L. (2010) Atmospheric water vapor and cloud liquid water retrieval over the Arctic Ocean using satellite passive microwave sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. - Vol. 48. - P. 283–294.
24. Дикинис А.В., Заболотских Е.В., Мостаманди С.В., Неелова Л.О. (2010) Оценка количественных характеристик штормовых циклонов // Ученые записки РГГМУ. - 2010. - №16. - С. 51-58.
25. Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., Смирнова Ю.Е. (2010) Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Ученые записки РГГМУ. - 2010. - №16. - С. 59-76.
26. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П. (2010) Сравнительная оценка существующих и перспективных методов исследования в области мониторинга и прогнозированая мезомасштабных циклонических вихрей, включая полярные циклоны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2010. - №3. - С. 23-29.
27. Заболотских Е.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Черный И.В. (2002) О точности микроволновых спутниковых измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2002. - № 5. - С. 592 – 596.
28. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М. (2000) Нейронно-сетевые алгоритмы восстановления скорости приводного ветра по данным SSM/I и их валидация // Исследование Земли из космоса. – 2000. - №2. - С. 62-71.