

На правах рукописи

ПИЧУГИН МИХАИЛ КОНСТАНТИНОВИЧ

**РОЛЬ ХОЛОДНЫХ ВТОРЖЕНИЙ В ТЕПЛООБМЕНЕ
ЯПОНСКОГО МОРЯ С АТМОСФЕРОЙ**

Специальность 25.00.28–Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Владивосток–2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, **Митник Леонид Моисеевич**

Официальные оппоненты: **Репина Ирина Анатольевна**, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Василевская Любовь Николаевна, кандидат географических наук, доцент Дальневосточного Федерального университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ФГБУ ИО РАН)

Защита состоится «16» июня 2017 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д005.017.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, 690041.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук и на сайте института <http://poi.dvo.ru/drupal/edu/disslist>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

Храпченков Федор Фомич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Перенос тепла на границе раздела океан–атмосфера оказывает существенное влияние на разномасштабные процессы и явления в системе взаимодействующих сред и является одним из ключевых звеньев в задачах прогноза погоды и климата. К важнейшим количественным характеристикам теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы относятся вертикальные турбулентные потоки явного, скрытого тепла и импульса (количества движения). Турбулентные потоки тепла не только являются составляющими теплового баланса поверхности океана, но и количественно определяют разнообразные обратные связи в климатической системе Земли (Лаппо и др., 1990). Не менее важным представляется изучение вклада в средний годовой или сезонный перенос тепла и влаги интенсивных морских погодных систем (МПС) со штормовыми / ураганскими ветрами и экстремальными вертикальными потоками тепла с морской поверхности (Бортковский, 1983). Увеличение интенсивности процессов теплообмена относится и к холодным вторжениям.

Холодные вторжения (ХВ) наблюдаются над обширными районами средних и высоких широт в холодный сезон года и сопровождаются резким понижением приземной температуры и опасными метеорологическими явлениями. Значительный интерес к ХВ, проявляемый в метеорологии и океанологии, определяется связанным с вторжениями интенсивным теплопереносом с морской поверхности в атмосферу за счет турбулентных потоков явного и скрытого тепла (Grossman, Betts, 1990; Brümmer, 1996; Bond, Cronin, 2008; Jensen et al., 2011), а также возможной ролью экстремальных потоков тепла в формировании глубинных и/или придонных водных масс (Marshall, Schott, 1999; Yasuda, 1997; Shcherbina et al., 2003; Nakamura et al., 2006).

С ХВ связаны климатически значимые процессы в атмосфере и океане, а также неблагоприятные и опасные погодные явления. К таким явлениям, в

частности, относятся атмосферные полярные циклоны (ПЦ) (Rasmussen, Turner, 2003) и фронтальные зоны в атмосфере (Businger, 1985; Grønås, Skeie, 1999), прохождение которых сопровождается резким усилением ветра. Одной из важнейших проблем в моделировании климата средних и высоких широт является воспроизведение ПЦ, а также адекватное описание в численных моделях адвекции холода в прибрежных районах или прикромочной зоне морского льда и возникающей при вторжении над океанической поверхностью упорядоченной конвекции в пограничном слое атмосферы. Существующие пробелы в моделировании таких атмосферных процессов подчеркивают актуальность исследования структуры, характеристик и эволюции *XВ* над морской поверхностью как явления, достоверно воспроизводимого прогностическими моделями в полях основных гидрометеорологических параметров, так и связанных мезомасштабных циркуляций. Исследование долгопериодной изменчивости активности *XВ* может способствовать улучшению моделирования климата.

В исследованиях (Kawamura, 1998; Dorman et al., 2004) неоднократно отмечалось, что Японское море, относится к району, над которым повторяемость *XВ* высока. Климатические условия моря в значительной мере определяются муссонной циркуляцией атмосферы, приводящей в холодный период к частым вторжениям континентальной воздушной массы и суровым погодным условиям. Исследованию теплообмена поверхности Японского моря с атмосферой, в том числе в холодный сезон года, посвящено множество работ (Miyazaki, 1952; Алдошина, 1957; Manabe, 1957, 1958; Радзиховская, 1961; Ninomiya, 1964; Малкус, 1965; Kato, Asai, 1983; Kang et al., 1994; Kondo et al., 1994; Park et al., 1995; Hirose et al., 1996; Kawamura, Wu, 1998; Дашко, Варламов, 2002; Scotti, 2005; Dorman et al., 2006). Рассчитанные в них оценки составляющих теплового баланса, включая вертикальные турбулентные потоки явного и скрытого тепла, существенно отличаются. Значения суммарного теплообмена бассейна меняется от -85 до -24 Вт/м² (знак «-» означает, что морская поверхность отдает тепло в атмосферу), что отчасти

объясняется различием применяемых алгоритмов расчета потоков. Кроме того, в большинстве случаев оценки потоков были выполнены по судовым наблюдениям, плотность распределения которых весьма неравномерна как по пространству, так и времени. Проблема достоверных сведений о роли *ХВ* в теплообмене поверхности Японского моря существенно ограничивает их учет на синоптических временных масштабах (1–7 суток) и затрудняет их использование в климатических моделях. Изложенное выше обосновывает **актуальность исследования** структуры, характеристик и эволюции холодных вторжений над Японским морем, а также необходимость получения количественных оценок роли вторжений в турбулентном теплопереносе с морской поверхности в атмосферу.

Важным аспектом в исследовании характеристик *ХВ* является их идентификация над водной поверхностью. Предложенные ранее критерии их регистрации (далее–критерии) (Konrad, Colucci, 1989; Zhang et al., 1997; Dorman et al., 2004; Jeong, Ho, 2005; Vavrus et al., 2006; Kolstad, Bracegirdle, 2008; Park et al., 2011) отличаются друг от друга, поскольку опираются на различные гидрометеорологические переменные: температуру воздуха у поверхности или на изобарических уровнях, атмосферное давление у поверхности Земли, ТПО и др. Применение различных критериев приводит к существенной неопределенности в оценках как внутрисезонной, так и межгодовой изменчивости повторяемости *ХВ*, в том числе и над Японским морем.

Перспективным подходом в разработке критерия и изучении структуры и характеристик *ХВ* над океанической поверхностью является комплексирование спутниковых оценок параметров системы океан-атмосфера и данных реанализов нового поколения. С запуском новых спутниковых инструментов и развитием алгоритмов восстановления геофизических параметров возможность получения регулярных площадных оценок тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой осуществляется со все более высоким пространственным и временным разрешением. Этот подход

систематически применен в данной работе при исследовании *XV* над Японским морем.

Основная цель работы – исследование структуры, характеристик и эволюции холодных вторжений над Японским морем с использованием спутниковых измерений в различных диапазонах длин волн (мультисенсорный подход) и данных реанализа. Особое внимание уделено оценке вклада вторжений в турбулентный теплообмен моря в холодный сезон года.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели решались **следующие задачи:**

1. Оценить эффективность применения спутникового дистанционного зондирования (по сравнению с ограниченным набором спутниковых и/или контактных измерений) для исследования характеристик *XV* по восстановленным полям основных гидрометеорологических параметров;
2. Сформировать архив мультисенсорных спутниковых данных за 16 холодных сезонов (ноябрь - март) с 2000 по 2016 гг. и разработать программные средства для их обработки, анализа и визуализации;
3. Изучить разномасштабные процессы в системе морская поверхность-атмосфера при холодных вторжениях: синоптические условия, упорядоченную конвекцию в пограничном слое атмосферы и изменение характеристик приводного ветра и паросодержания атмосферы в зонах влияния прибрежной орографии и океанических фронтов путем совместного анализа оптических, микроволновых пассивных и активных спутниковых данных;
4. Разработать критерии идентификации *XV* по спутниковым данным;
5. Изучить общие закономерности и региональные особенности пространственно-временной изменчивости турбулентных потоков явного и скрытого тепла с поверхности Японского моря в атмосферу, оценить их

экстремальные значения и определить связь с внутрисезонными и межгодовыми вариациями характеристик *ХВ*;

6. Оценить вклад *ХВ* в турбулентный теплообмен моря с атмосферой в холодный сезон года.

Основные положения, выносимые на защиту.

- На основе подготовленного архива мультисенсорных спутниковых данных, охватывающего период 2000-2016 гг., определены характеристики и исследованы структура и эволюция *ХВ* над Японским морем. Показано, что вторжения, площадь которых больше половины площади моря, характеризуются скоростью приводного ветра $W = 10-20$ м/с, и паросодержанием воздушной массы в 2–3 кг/м² у западного побережья моря и 12–15 кг/м² у восточного.

- За 16 холодных сезонов (ноябрь–март) зарегистрировано 403 *ХВ* с продолжительностью D от 0,5 до 7 сут. Впервые определено, что наиболее типичны для Японского моря *ХВ* с $D < 1$ сут. (146 случаев или 36% всех вторжений). Около 30% таких вторжений сопровождалось ветром $W > 20$ м/с и экстремальным тепло- массопереносом через морскую поверхность.

- Установлено, что синоптическая изменчивость турбулентного теплообмена поверхности моря с атмосферой определяется холодными вторжениями. Величина суммарного потока при этом менялась от 150–200 Вт/м² до 1000–1400 Вт/м². Экстремальные значения потока явного тепла достигали 600 Вт/м² и скрытого тепла 800 Вт/м².

- Определяющую роль в режиме турбулентного теплообмена поверхности моря с атмосферой играют *ХВ*. Суммарная продолжительность вторжений в период 2000-2016 г. составляла 17–29% от продолжительности холодных сезонов, однако их вклад в теплоперенос достигал 54%.

Научная новизна результатов, полученных в работе, заключается в следующем:

1. Впервые был построен наиболее полный архив репрезентативных спутниковых данных о характеристиках *ХВ* над *ЯМ* за 16 холодных сезонов

(ноябрь–март) с 2000 по 2016 гг. Детальное изучение характеристик вторжений обеспечено использованием комплексного подхода анализа измерений данных дистанционного зондирования с современных спутников, апробированных алгоритмов восстановления параметров и данных реанализа.

2. На основе этого архива было выполнено обобщение гидрометеорологических условий возникновения и особенностей эволюции вторжений над морем, вместе с тем полученные сведения позволили предложить критерии идентификации этого метеорологического режима над исследуемым бассейном.

3. На основе массивов полей турбулентных потоков явного (S) и скрытого (LE) тепла между океаном и атмосферой Objectively Analyzed Air-sea Fluxes ($OAFlux$) и Japanese Ocean Flux Datasets with Use of Remote Sensing Observations ($J-OFURO2$) изучены как общие закономерности, так и региональные особенности пространственно-временной изменчивости потоков, оценены их экстремальные значения и количественно подтвержден определяющий вклад ХВ в режим турбулентного теплообмена поверхности ЯМ с атмосферой в холодный сезон года.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается: использованием апробированных методов обработки спутниковых данных в различных диапазонах длин волн с пространственным разрешением от 100 м (РСА) до 20-25 км (микроволновые радиометры и скаттерометры) и современных алгоритмов восстановления гидрометеорологических параметров; многолетним опытом дешифрирования спутниковых измерений. При интерпретации учитывались опубликованные результаты численного моделирования мезомасштабной валиковой и ячейковой конвекций в пограничном слое атмосферы. Все количественные оценки турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой получены с использованием репрезентативных источников, опирающихся на согласованные данные спутникового дистанционного зондирования, контактных наблюдений и реанализа. Основные результаты работы

опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных публикациях, неоднократно обсуждались на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях.

Научная и практическая значимость определяется возможностью использовать сформированный и пополняемый архив спутниковых оценок гидрометеорологических параметров для уточнения сведений об опасных/неблагоприятных метеорологических явлениях над Японским морем в холодный сезон года; настройки и валидации региональных моделей атмосферной циркуляции, включая адекватное воспроизведение упорядоченной конвекции в ПСА; применения новых критериев идентификации холодных вторжений, учитывающих как синоптические, так и мезомасштабные особенности эволюции процесса над морем. Выявленные региональные особенности режима турбулентного теплообмена поверхности Японского моря с атмосферой необходимо учитывать и в задачах численного моделирования циркуляции вод бассейна, в том числе формирования глубокой конвекции на материковом склоне. Результаты исследования долгопериодной изменчивости повторяемости ХВ могут представлять интерес в исследованиях динамики климатической системы Азиатско-Тихоокеанского региона.

Личный вклад автора

Научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автору принадлежит определяющая роль в изучении и построении методологии анализа характеристик холодных вторжений, формировании архива спутниковых данных, расчетах и интерпретации результатов. Автору принадлежит комплекс программ для систематизации, обработки, анализа и визуализации разнородной спутниковой и сопутствующей информации. Подготовка к публикации основных результатов в рецензируемых российских и международных журналах проводилась совместно с соавторами.

Апробация работы

Основные положения работы доложены на следующих международных и всероссийских симпозиумах и конференциях: Proc. 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISPRS), 2009; Proc. International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2009, 2011; Всероссийской открытой ежегодной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, 2009–2014; 8th IOC/WESTPAC International Scientific Symposium Ocean Climate and Marine Ecosystems in the Western Pacific, 2011; Proc. 92nd AMS Annual Meeting, 18th Conference on Satellite Meteorology, 2012; International Conference «Remote Sensing of Environment: Scientific and Applied Research in Asia-Pacific», 2013; AOGS 11th Annual Meeting, 2014; EUMETSAT Meteorological Satellite conference, 2015. Также материалы диссертационной работы доложены на семинаре лаборатории климатологии ИГ РАН, кафедры океанологии и гидрометеорологии ДВФУ и заседании Ученого совета Физического направления ИО РАН (ноябрь, 2016).

Отдельные результаты использовались при выполнении проектов по грантам РФФИ, программ фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» и «Спутниковый мониторинг Дальнего Востока для проведения фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН» и федеральной целевой программы «Мировой океан».

Публикации по теме диссертации

По результатам диссертации опубликовано 24 работы, из которых 8 – статьи, опубликованные в научных изданиях из перечня ВАК и 16 – тезисы докладов на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 216 наименований и двух приложений. Работа содержит 171 страницу текста, включая 25 таблиц и 56 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведен обзор проблем исследования структуры и характеристик холодных вторжений как интенсивных морских погодных систем, сопровождающихся опасными и неблагоприятными метеорологическими явлениями и экстремальным тепло- влагопереносом через морскую поверхность в атмосферу. Обосновывается актуальность выбранной темы. Формулируются основная цель исследования, решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов и научная и практическая значимость. Приведено описание структуры диссертации и приводится список опубликованных автором статей по теме диссертации.

В **Главе 1** приводится описание физико-географических особенностей Японского моря. Рассмотрены характеристики основных центров действия атмосферы, синоптических условий и разномасштабных барических систем, типичных для холодного сезона года. Особое внимание уделено анализу ветрового режима и поверхностной циркуляции вод моря, в том числе распределения температуры поверхности океана во фронтальных системах, включая субарктический фронт. Обоснована необходимость использования данных спутникового мультисенсорного зондирования для получения количественных оценок гидрометеорологических параметров.

Глава 2 диссертационной работы содержит обзор современного состояния исследования теплообмена поверхности Японского моря с атмосферой. В ней представлены основные результаты оценок турбулентных составляющих теплового баланса морской поверхности, в том числе экстремальных значений в холодный сезон года, и проведен их сравнительный анализ как для сезонов года, так и отдельных месяцев. Обсуждаются причины значительных расхождений в оценках вертикальных потоков и связь холодных вторжений с их экстремальными значениями. Отмечается существенное различие в оценках как среднегодового теплового баланса поверхности

Японского моря, так и турбулентных составляющих в зимние месяцы, что отчасти объясняется различием применяемых алгоритмов расчета потоков. Кроме того, в большинстве случаев оценки потоков были выполнены по судовым наблюдениям, плотность распределения которых по пространству и времени весьма неравномерна. При сопоставлении выполненных оценок пространственного распределения вертикальных потоков явного и скрытого выделяется северо-западная часть бассейна, которая в холодный сезон года является районом со сложным гидрометеорологическим режимом, характеризующимся зимой частыми экстремальными погодными условиями, мезомасштабной атмосферной циркуляцией, влиянием прибрежной орографии суши. Вероятно, для изучения режима турбулентного теплообмена в этом районе особенно важно использование площадных измерений параметров системы океан-атмосфера с пространственно-временным разрешением, учитывающим региональные особенности.

В **Главе 3** рассмотрены данные и методы используемые в работе для исследования характеристик ХВ, включая турбулентный теплообмен между океаном и атмосферой. В **разделе 3.1** описан параметрический метод расчета вертикальных турбулентных потоков явного (S) и скрытого (LE) тепла через морскую поверхность с приведением погрешностей оценок при различных гидрометеорологических условиях, в том числе для холодных вторжений над Японским морем. В частности, приведены результаты сопоставления прямых измерений S и LE , выполненных с самолета над морем Ирмингера и Датским проливом (северо-западная часть Атлантического океана) в период интенсивного ХВ, с потоками, рассчитанными по алгоритму COARE 3.0. Исследователи показали, что при осреднении за 1 час измеренные потоки на 30% (50 Вт/м^2) выше рассчитанных. В разделе обращается внимание на значительные погрешности оценок экстремальных значений турбулентных потоков при штормовых (более 25 м/с) и ураганных (более 33 м/с) ветрах. В **разделах 3.2 и 3.3** продемонстрированы возможности и преимущества

спутниковых измерений в исследованиях разномасштабной изменчивости турбулентного теплообмена. Обосновано применение массивов среднесуточных потоков S и *LE Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAF_{lux})* и Japanese Ocean Flux Data sets with Use of Remote Sensing Observations (*J-OFURO2*), разработанных по данным спутникового дистанционного зондирования, контактных наблюдений и реанализов. В **разделе 3.4** предложена методика мультисенсорного спутникового зондирования применительно к анализу характеристик холодных вторжений над морем и приведены основные характеристики используемых в работе спутников и установленных на них приборов.

В **Главе 4** представлен детальный анализ структуры, характеристик и эволюции холодных вторжений за период 2000–2016 гг. в полях облачности, скорости и направления приводного ветра, интегрального содержания водяного пара в атмосфере, водозапаса облаков, интенсивности осадков, температуры поверхности океана, яркостных температур уходящего излучения системы подстилающая поверхность-атмосфера в инфракрасном и микроволновом диапазонах длин волн.

В **разделе 4.1** продемонстрирована эффективность мультисенсорного подхода (по сравнению с ограниченным набором спутниковых и/или контактных измерений) при изучении *XВ* и сопровождающих вторжения разномасштабных процессов над Японским морем таких, как упорядоченная конвекция в пограничном слое атмосферы и струи ветра, обусловленные прибрежной орографией. На основе сформированного архива спутниковых данных за 16 холодных сезонов (ноябрь–март) 2000–2016 гг. было зарегистрировано 403 случая *XВ*. Как правило, вторжения возникали в тылу внетропических циклонов синоптического масштаба (южных циклонов), перемещавшихся вдоль Японских островов со скоростью более 60 км/ч в северную часть моря или к северо-восточному побережью о. Хонсю (рисунок 1а). В отдельных случаях адвекция холода с континента определялась

обширной циклонической системой над Курильскими островами и открытой частью Тихого океана. Над морем атмосферный процесс надежно регистрировался по конвективным облачным грядам и ячейкам (рисунки 1б и 2а), образующимся в пограничном слое атмосферы.

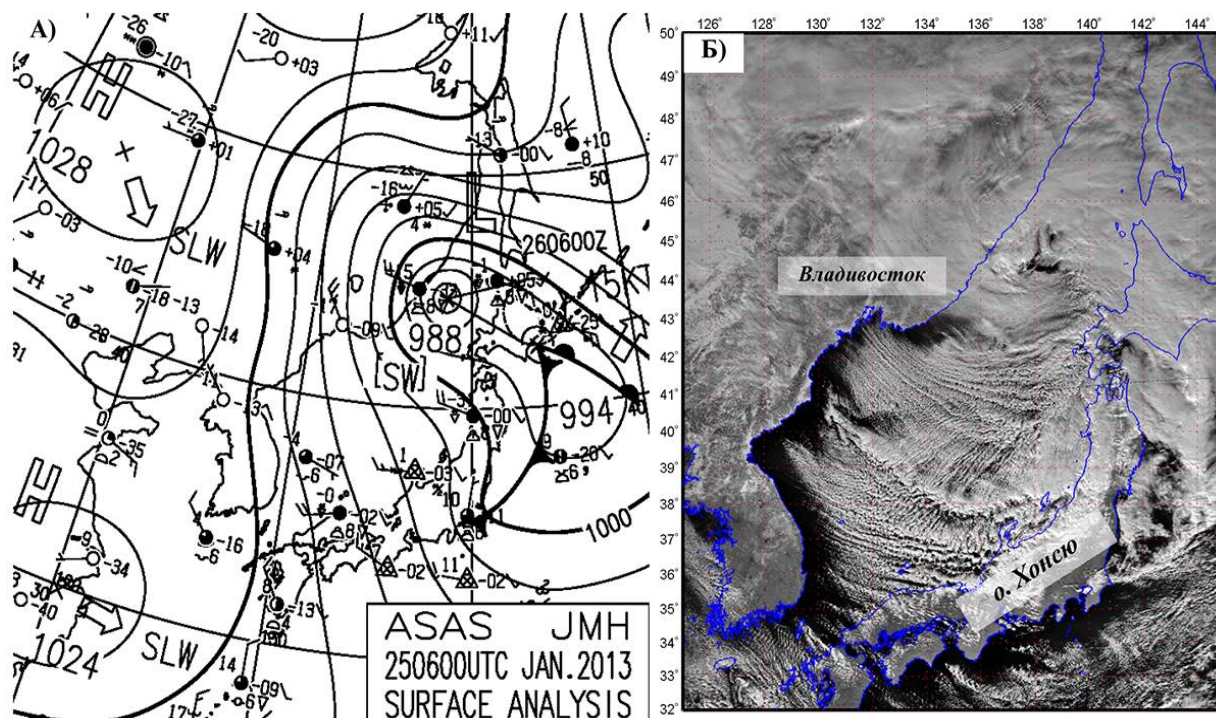


Рисунок 1. Холодное вторжение над Японским морем 25 января 2013 г.: - карта приземного анализа японского метеорологического агентства за 06 Гр. (А) и видимое изображение, полученное спектрометрией MODIS со спутника Aqua в 04:20 Гр. (Б)

Во время ХВ над Японским морем значения скорости ветра у морской поверхности (W) варьировали в диапазоне от 10 до 20 м/с (рисунки 2б, в, г). В стадии максимального развития скорость ветра в наиболее интенсивных вторжениях достигала 25-27 м/с. Штормовой ветер отмечался преимущественно в открытой части моря юго-восточной зал. Петра Великого и у северо-западного побережья о. Хонсю. Над северо-западной частью моря ХВ отмечалось крайне низким паросодержанием атмосферы $V = 2-5$ кг/м² (рисунок 2д). При пересечении субарктического фронта ЯМ

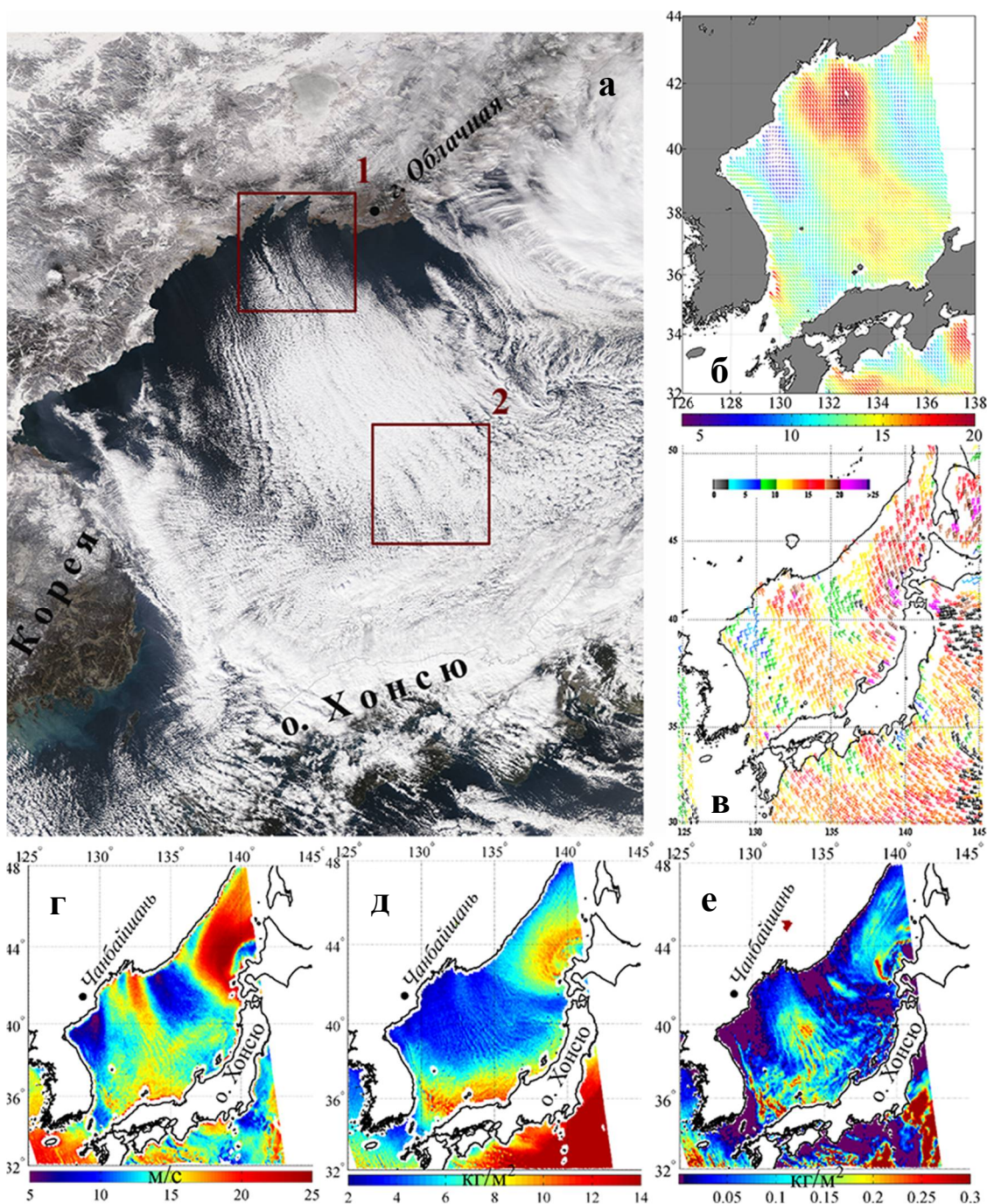


Рисунок 2. Холодное вторжение над Японским морем 27 декабря 2013 г.: (а) на видимом изображении, полученном спектрометрией MODIS со спутника Aqua в 04:06 Гр.; в полях вектора ветра (м/с) в стадии максимального развития, полученных из измерений скаттерометров ASCAT с европейских спутников MetOp-A, B (б) в 12:35 Гр. и OSCAT с индийского спутника Oceansat-2 (в) в 14:05 Гр.; в полях приводного ветра (г), паросодержания атмосферы (д) и водозапаса облаков (е), восстановленных по алгоритмам (Митник, Митник, 2011; Zabolotskih et al., 2013) из измерений AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 04:06 Гр.

трансформирующейся континентальной воздушной массой паросодержание атмосферы возрастало на 4-6 кг/м² на расстоянии 100 км и составляло 10-12

кг/м² над Цусимским течением у западного побережья о. Хонсю.

Раздел 4.2 посвящен обзору существующих и разработке новых методов идентификации *ХВ*. Анализ гидрометеорологических условий возникновения и эволюции вторжений над морем позволил предложить критерии регистрации этого метеорологического режима над морем по векторным полям приводного ветра и спутниковым видимым / ИК изображениям облачности. Во-первых, вторжения всегда сопровождаются мезомасштабной упорядоченной конвекцией над морской поверхностью, возникающей при неустойчивой стратификации атмосферы. Во-вторых, адвекция холода с континента должна сопровождаться приводным ветром С–З румбов со скоростью, превышающей некоторое пороговое значение W_0 , которое может меняться в зависимости от температуры и влажности воздуха. При обобщении полученных сведений о *ХВ* в работе W_0 установлено равным 10 м/с. Продолжительность вторжения определялась как период, в течение которого площадь зоны вторжения охватывала большую часть (> 50%) площади Японского моря.

В разделе **4.3** проанализированы внутрисезонная и межгодовая изменчивость характеристик *ХВ*. Впервые установлено, что продолжительность вторжений (D) над морем существенно варьирует в диапазоне от 0,5 до 7 сут. При этом плотность распределения D описывается экспоненциальной функцией с максимумом (146 случаев) для D менее 1 сут. (рисунок 3) В работе (Dorman et al., 2004) такие непродолжительные вторжения не анализировались, однако именно они являются наиболее типичными для Японского моря. Около 30% *ХВ* с $D < 1$ сут., в стадии максимального развития, сопровождались штормовым ветром (более 20 м/с), что обуславливало экстремальный тепло- массоперенос через морскую поверхность в атмосферу.

В этом же разделе рассмотрена статистическая взаимосвязь между повторяемостью *ХВ* и межгодовой изменчивостью температуры воздуха у поверхности (T_a), взятой из реанализа высокого разрешения NCEP-CFSR.

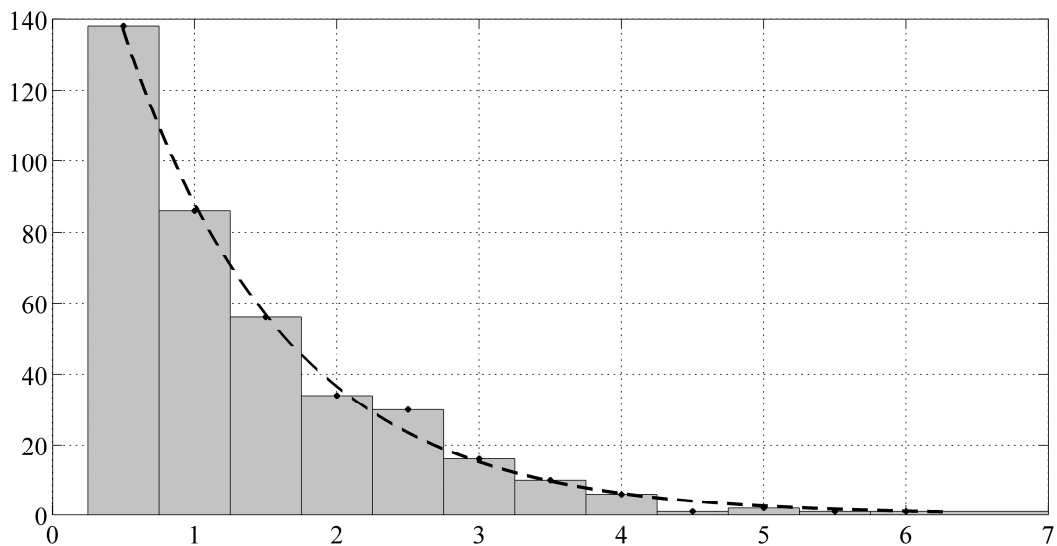


Рисунок 3. Гистограмма распределения продолжительности холодных вторжений над Японским морем за 16 холодных сезонов 2000–2016 гг. Пунктирная линия– аппроксимирующая экспоненциальная функция

Наиболее тесная обратная корреляция количества вторжений и $T_a (> 10,80)$ отмечается для области с центром на $47,5^\circ$ с.ш., $135,5^\circ$ в.д. над континентальной частью Дальнего Востока (рисунок 4а). В выделенной области временной ряд аномалии T_a (характеризующей повторяемость вторжений над Японским морем) за 37 холодных сезонов 1979–2016 гг. содержит квазиколебание, наиболее выраженное в вариациях пятилетнего скользящего среднего (черная кривая) с 2004 г. по 2014 г. (рисунок 4б).

В **главе 5** рассмотрены как общие закономерности, так и региональные особенности пространственно-временной изменчивости потоков явного и скрытого тепла, оценены их экстремальные значения и определен вклад XB в режим турбулентного теплообмена в холодный сезон года.

В **разделе 5.1** проведен сравнительный анализ распределения вертикальных потоков S и LE в холодный сезон года по данным массива $J-OFURO2$, полученного преимущественно по спутниковым оценкам гидрометеорологических параметров, и массива $OAFlux$, основанного на данных реанализов National Centers for Environmental Prediction ($NCEP$) и European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ($ECMWF$). Установлено, что в области распространения Цусимского течения оценки суммарного

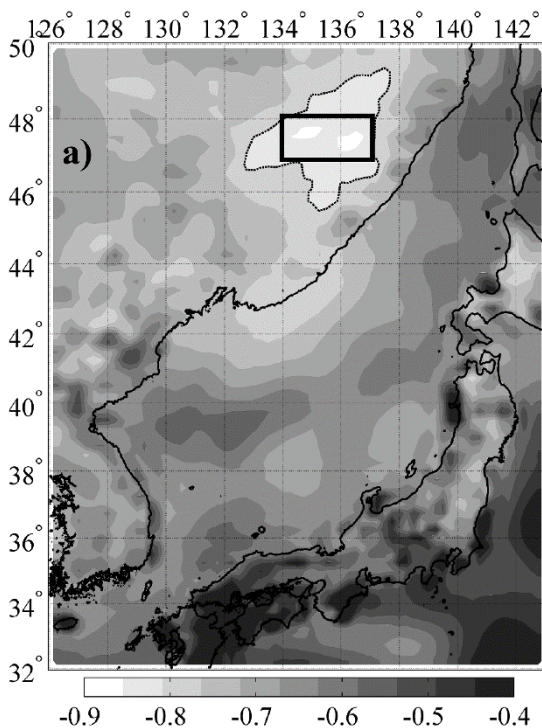
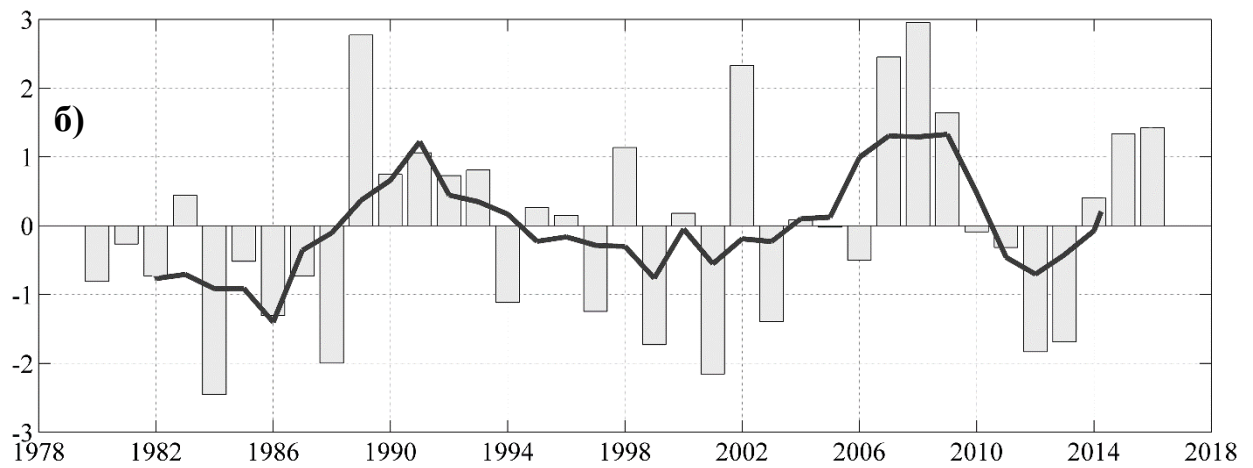


Рисунок 4. (а) - пространственное распределение коэффициента корреляции (R) между повторяемостью ХВ над ЯМ и T_a , осредненной за каждый холодный сезон 2000–2016 гг. Линией выделена область с $|R| \geq 0,8$. Черный прямоугольник - зона высокой корреляции.

(б) - диаграмма межгодовой изменчивости аномалии температуры воздуха у поверхности (ΔT_a , °C) в зоне высокой корреляции (0,8–0,85) для 37 холодных сезонов 1979–2016 гг. Аномалии вычислены как отклонения от T_a , осредненной за все холодные сезоны. Черная кривая – 5-летнее скользящее среднее.

потока тепла из массивов OAFlux и J-OFURO2 характеризуются максимальной теплоотдачей с морской поверхности (большой частью за счет испарения), достигающей в районе северо-западного побережья о. Хонсю 300–350 Вт/м². В полях вертикальных потоков тепла по данным J-OFURO2, выделяются локальные зоны интенсификации теплопереноса в атмосферу у северо-западного побережья ЯМ (рисунок 5в) как в среднемесячных полях (декабрь–февраль), так и осредненных за весь холодный сезон (ноябрь–март). Впервые выделена обширная область над Центральной котловиной моря севернее поднятия Ямато, с которой теплоотдача моря за счет S и LE минимальна (рисунки 5в, е). Область минимума выделяется в полях

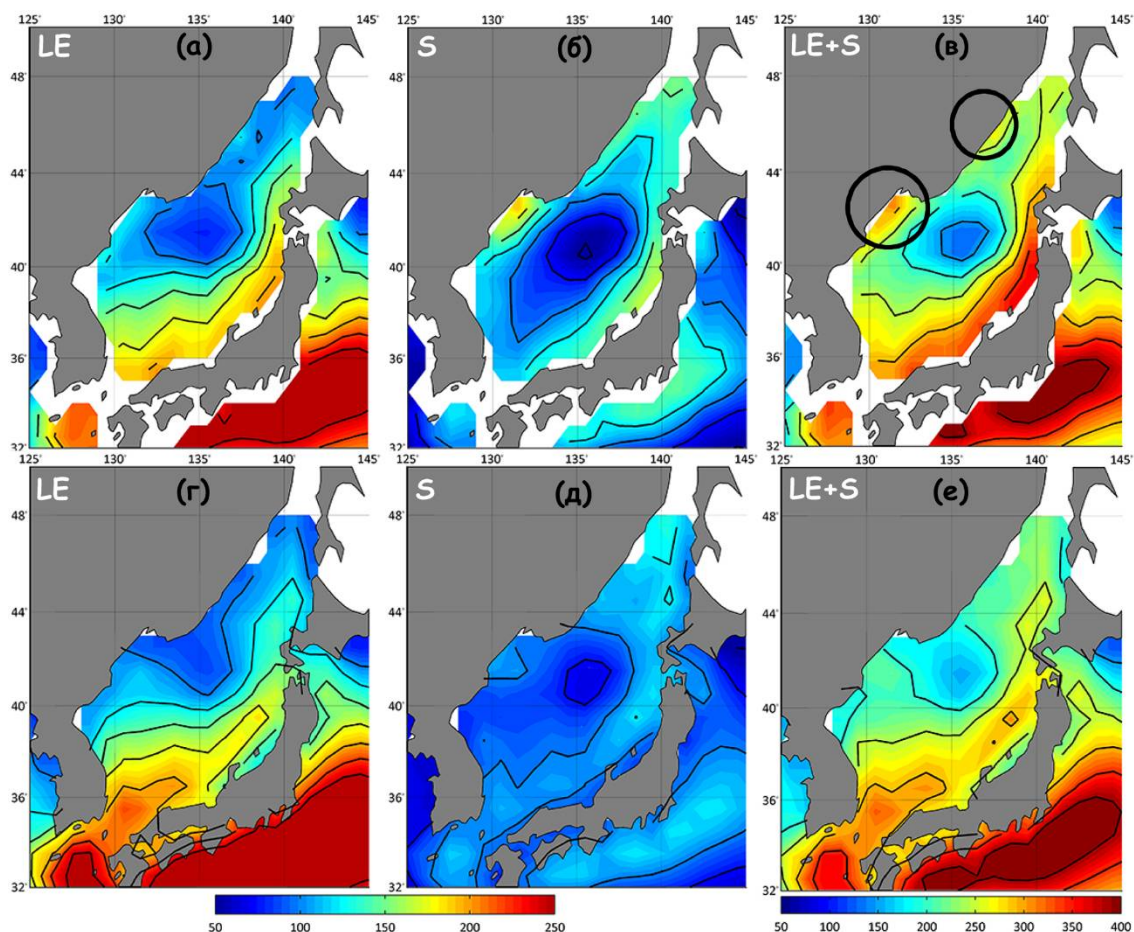


Рисунок 5. Вертикальные потоки явного S (б, д), скрытого LE (а, г) и суммарного $S+LE$ (в, е) тепла ($Вт/м^2$) от морской поверхности в атмосферу, осредненные за 20 холодных сезонов (ноябрь-март, 1988 - 2008) по данным *J-OFURO2* (верхний ряд) и *OAFflux* (нижний ряд).

Черные окружности на (в) отмечают максимумы суммарного теплопереноса у побережья.

среднемесячных потоков на протяжении любого холодного сезона с 1988 по 2007 гг. и находится в пределах циклонического круговорота в субарктической части моря.

Раздел 5.2 содержит анализ временной изменчивости турбулентной теплоотдачи через морскую поверхность в атмосферу в холодные сезоны года как для отдельных районов, так и всего моря. Показано, что синоптическая изменчивость потоков S и LE в зимние месяцы определяется холодными вторжениями с характерной амплитудой колебания в $400-500 \text{ Вт/м}^2$ и экстремальными значениями потоков явного и скрытого тепла, достигающими $500-700$ и $700-900 \text{ Вт/м}^2$, соответственно. Для северо-западной части моря в

холодный сезон года характерно преобладание потока явного тепла над скрытым со средним отношением Боуэна ($B=S / LE$) 1,6–1,8, однако во время ХВ B достигает 2,5–3.

В разделе 5.3 показано, что за исследуемый период суммарная продолжительность вторжений варьирует от 17 до 29% от продолжительности холодного сезона (ноябрь–март), однако их вклад в теплоперенос с морской поверхности в атмосферу достигает 54%. (см. таблицу).

Таблица. Характеристики интенсивности холодных вторжений над Японским морем с 2000 по 2008 гг. и их вклад в интегральный турбулентный теплообмен моря за холодный сезон года

№	Холодные сезоны	Кол-во ХВ	Сумм. прод-ть ХВ, сут.	Кол-во тепла за сезон ($\times 10^{18}$ Дж)	Кол-во тепла во время ХВ ($\times 10^{18}$ Дж)	Вклад ХВ (%)
1	2000/2001	31	39	3430	1770	52
2	2001/2002	27	28,5	3140	1430	46
3	2002/2003	28	33,5	3240	1580	49
4	2003/2004	25	30	3200	1410	44
5	2004/2005	30	42	3470	1810	52
6	2005/2006	26	44,5	3380	1840	54
7	2006/2007	19	27	2830	1040	37
8	2007/2008	18	26	3280	1140	35

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. За 16 холодных сезонов (ноябрь – март) 2000–2016 гг. было зарегистрировано 403 вторжения холодного воздуха с континента на Японское море со скоростью ветра у поверхности $W \geq 10$ м/с. Типичные значения W варьировали в диапазоне от 10 до 20 м/с. В стадии максимального развития скорость ветра в наиболее интенсивных вторжениях достигала 25-27 м/с. Штормовой ветер отмечался преимущественно в открытой части моря юго-восточной залива Петра Великого и у северо-западного побережья о. Хонсю.
2. Вторжения возникали преимущественно в тылу внетропических циклонов синоптического масштаба (южных циклонов), перемещавшихся вдоль Японских островов со скоростью более 60 км/ч в

северную часть моря или к северо-восточному побережью о. Хонсю. В отдельных случаях быстрая адвекция холода с континента определялась циклонической циркуляцией обширной области пониженного давления над Курильскими островами и открытой частью Тихого океана. Над северо-западной частью моря *XВ* характеризовались крайне низким паросодержанием атмосферы (V) 2–6 кг/м², однако при пересечении моря трансформирующейся континентальной воздушной массой паросодержание атмосферы возрастало на 4–6 кг/м² на расстоянии 100 км и составляло 10–12 кг/м² над Цусимским течением у западного побережья о. Хонсю.

3. Разработаны критерии регистрации *XВ* над *ЯМ* по векторным полям приводного ветра и спутниковым видимым / ИК изображениям облачности. При адвекции холода с континента скорость северо-западных ветров превышала 10 м/с, а над морской поверхностью формировалась мезомасштабная упорядоченная конвекция вследствие неустойчивой стратификации атмосферы.
4. Впервые показано, что продолжительность D холодных вторжений над *ЯМ* меняется от 0,5 до 7 сут. Плотность распределения продолжительности вторжений описывается экспоненциальной функцией. Максимальное количество вторжений (146) имеют продолжительность $D < 1$ сут. Скорость ветра в 30% таких вторжений превышала 20 м/с, что обуславливало экстремальный тепло-массоперенос через морскую поверхность в атмосферу. В работе (Dorman et al., 2004) и ряде других *XВ* с $D < 1$ не анализировались.
6. Проведен сравнительный анализ пространственно-временной изменчивости турбулентного теплообмена между поверхностью *ЯМ* и атмосферой в холодный сезон года по данным массивов *J-OFURO2* и *OAFlux*. Показано, что в полях вертикальных потоков тепла из *J-OFURO2*, выделяются локальные зоны интенсификации теплопереноса в атмосферу у северо-западного побережья *ЯМ* как в среднемесячных

полях (декабрь–февраль), так и осредненных за весь холодный сезон (ноябрь–март). В этих районах во время вторжений регистрируется местное усиления приводного ветра под действием прибрежной орографии с W на 30–40% выше фоновых значений.

7. Впервые выделена обширная область морской поверхности над Центральной котловиной севернее поднятия Ямато, с которой теплоотдача моря за счет S и LE минимальна. Область минимума выделяется в полях среднемесячных потоков на протяжении любого холодного сезона с 1988 по 2008 гг. и находится в пределах циклонического круговорота субарктической части моря.
8. Установлено, что синоптическая изменчивость турбулентного теплообмена поверхности моря с атмосферой в зимние месяцы определяется холодными вторжениями и характеризуется амплитудой колебания в 400–500 Вт/м² с экстремальными значениями потоков явного и скрытого тепла, достигающими 500–700 и 700–900 Вт/м², соответственно. Для северо-западной части моря в холодный сезон года характерно преобладание потока явного тепла над скрытым со средним отношением Боуэна $B = 1,6–1,8$ однако во время XB B достигает 2,5–3.
9. Определено, что суммарная продолжительность вторжений варьирует от 17 до 29% от продолжительности холодного сезона (ноябрь–март), однако их вклад в теплоперенос с морской поверхности в атмосферу достигает 54%. Такие оценки показывают, что XB являются ключевым атмосферным процессом синоптического масштаба, определяющим режим турбулентного теплообмена Японского моря в холодный сезон года.
10. Выявлена статистическая взаимосвязь между повторяемостью XB и межгодовой изменчивостью температуры воздуха у поверхности (T_a), взятой из реанализа высокого разрешения *NCEP-CFSR*. Наиболее тесная обратная корреляция количества вторжений и T_a ($> |0,80|$) отмечается для

области с центром на 47,5° с.ш., 135,5° в.д. над континентальной частью Дальнего Востока.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Пичугин М.К., Митник Л.М. Холодные вторжения над Беринговым морем: анализ по данным спутниковых микроволновых и оптических измерений, радиозондирования атмосферы и океанических буев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 172-179. (РИНЦ, SCOPUS)
2. Пичугин М.К. Взаимодействие океана и атмосферы при холодных вторжениях над Беринговым морем по спутниковым измерениям: возможности радиометра AMSU-A // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. №4. С. 186 – 193.(РИНЦ, SCOPUS)
3. Гурвич И.А., Пичугин М.К. Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. №1. С. 51 - 59.(РИНЦ, SCOPUS)
4. Пичугин М.К., Пономарев В.И. Изменчивость потоков явного и скрытого тепла в северо-западной части Японского моря в холодный период года // Вестн. ДВОРАН. 2013. № 6. С. 22–29. (РИНЦ)
5. Чечин Д.Г., Пичугин М.К. Холодные вторжения над океаном в высоких широтах и связанные с ними мезомасштабные циркуляции в атмосфере: проблемы численного моделирования // Исследования Земли из космоса. 2015. N. 3. С. 71–78. (Chechin D.G., Pichugin M.K. Cold-air outbreaks over the ocean at high latitudes and associated mesoscale atmospheric circulations:

- Problems of numerical modelling // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. Vol. 51. No. 9. P. 1034-1050.) (WoS, РИНЦ, SCOPUS)
6. Митник Л.М., Митник М.Л., Чернявский Г.М., Чёрный И.В., Выкочко А.В., Пичугин М.К. Приводный ветер и морской лёд в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников Метеор-М No 1 и GCOM-W1 в январе-марте 2013 г. // *Исследование Земли из космоса*. 2015. N. 6. С. 36–46. (Mitnik L.M., Mitnik M.L., Chernyavsky G.M., Cherny I.V., Vykochko A.V., Pichugin M.K., Zabolotskikh E.V. Sea surface wind and sea ice in the Barents Sea using microwave sensing data from Meteor-M N1 and GCOM-W1 satellites in January–March 2013 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, N. 9. P. 1041–1050.) (WoS, РИНЦ, SCOPUS)
 7. Гурвич И.А., Заболотских Е.В., Пичугин М.К. Особенности мезомасштабного циклогенеза над восточным сектором Евразийской Арктики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 5. С. 227 - 237. (РИНЦ, SCOPUS)
 8. Пичугин М.К., Чечин Д.Г. Межгодовая изменчивость характеристик холодных вторжений над Японским морем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 5. С. 238 - 248. (РИНЦ, SCOPUS)

Статьи в научных сборниках:

1. Gurvich I.A., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Pichugin M. K. Multisensor satellite study of mesoscale cyclones over the Northern Pacific // Proc. 92nd AMS Annual Meeting, 18th Conference on Satellite Meteorology. New Orleans, LA, USA, 22-26 Jan, 2012. 13B.2 5pp.
2. Mitnik L.M., Gurvich I.A., Pichugin M.K. Satellite sensing of intense winter mesocyclones over the Japan Sea // Proc. IGARSS 2011, Vancouver, 25-29 July 2011. P. 2345-2348. (SCOPUS)
3. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Gurvich I.A., Vykochko A.V., Pichugin M.K., Cherny I.V. Water vapor, cloud liquid water content and wind speed in tropical,

extratropical and polar cyclones over the Northwest Pacific Ocean // Proc.
IGARSS 2012, Munich, 22-27 July 2012. P.1940-1943. (SCOPUS)