

Холодные вторжения над Беринговым морем: Спутниковый мультисенсорный анализ

М.К. Пичугин, Л.М. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: pichugin@poi.dvo.ru*

На основе спутниковых и контактных измерений выделены периоды холодных вторжений над Беринговым морем в 2002-2008 гг. и выполнен их комплексный анализ. За семь лет было выявлено 48 вторжений холодных воздушных масс, пространственный масштаб которых соизмерим с размером моря. Продолжительность вторжений варьировала от нескольких часов до нескольких суток. Наиболее продолжительные вторжения отмечались в феврале. При вторжениях преобладали ветры северных румбов со скоростью 10–25 м/с. От кромки льда вниз по потоку арктического воздуха развивались конвективные облачные гряды, расстояние между которыми (длина волны Λ) возрастало от 0,7-1 до 12-15 км. Гряды трансформировались в открытые и закрытые ячейки, размеры которых D варьировали от 1-2 до 50-60 км. Типичные значения паросодержания атмосферы в зонах холодных вторжений составляли 1-7 кг/м² и возрастали вниз по потоку. В работе представлены результаты мультисенсорного анализа эволюции интенсивного холодного вторжения, наблюдавшегося 1-7 февраля 2003 г.

Ключевые слова: взаимодействие океана и атмосферы, холодное вторжение, организованная конвекция, спутниковая метеорология, Aqua AMSR-E, QuikSCAT SeaWind, Берингово море.

Введение

Холодное вторжение (ХВ) представляет собой быстрое распространение арктической воздушной массы в более низкие широты. Вторжение сопровождается сильным ветром и возникновением хорошо развитого холодного фронта на линии раздела воздушных масс. Распространение над относительно теплой морской поверхностью сухого холодного воздуха вызывает интенсивный теплообмен между океаном и атмосферой. В районах интенсификации теплообмена возникают мезомасштабные атмосферные вихри (мезоциклоны), скорость ветра в которых может достигать 25-30 м/с, что представляет серьезную опасность для транспортных и рыбопромысловых операций на море.

ХВ наблюдаются в различных районах Мирового океана, но более часто в средних и высоких широтах. Они охватывают обширные районы, соизмеримые с размерами морей [1]. Продолжительность вторжения может достигать несколько суток, что приводит к значительному выхолаживанию морской поверхности. В результате отдачи тепла и влаги в атмосферу в океане образуются холодные и соленые более плотные воды, обуславливающие конвективное перемешивание в толще вод [2]. Совместное действие выхолаживания вод и сильного ветра (10-25 м/с) приводит к увеличению площади ледяного покрова в бассейне.

Существует множество теоретических и экспериментальных работ по ХВ, однако, над Беринговым морем это явление изучено недостаточно. В частности, отсутствует их статистика за последние несколько десятков лет. Получение статистических оценок стало особенно актуальным в связи с потеплением Арктики, проявления которого в разных арктических и полярных морях отличаются по амплитуде и знаку, что следует, например, из данных работы [3]. На основе глобальных климатических моделей и данных реанализа NCEP/NCAR за 40 лет с 1948 по 2003 гг. авторы выделили районы частых ХВ (более 3 суток за зимний период). К таким районам относятся северо-западная часть Северной Америки, Охотское и Берингово моря и ряд других. Нами получены статистические данные о ХВ над Беринговым морем за более поздний период – с 2002 г. по

2009 г, причем в отличие от большинства исследований, в работе использовались не только спутниковые видимые и инфракрасные (ИК) изображения, но и данные пассивного и активного микроволнового зондирования, позволившие, в частности, получить оценки паросодержания атмосферы и водозапаса облаков в области мезомасштабных конвективных гряд и ячеек.

С организованной мезомасштабной конвекцией, которая уверенно регистрируется на спутниковых изображениях, связаны существенные вариации температуры и влажности воздуха и скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Результаты детального исследования грядовой и ячейковой конвекции во время арктических холодных вторжений над Гренландским и Баренцевым морями приведены в [4]. Анализ серии самолетных измерений (показал, что в конвективных облачных грядах и ячейках амплитуды вариации температуры и влажности воздуха, горизонтальных и вертикальной компонент скорости ветра составляют $0.1 - 0.4$ °C, $0.03 - 0.3$ г/кг, $0.6 - 2.5$ и $0.4 - 1.8$ м/с, соответственно.

В более поздних работах [5, 6] промоделировано развитие мезомасштабной организованной конвекции по данным береговой станции радиозондирования в море Лабрадор. Полученные гидрометеорологические характеристики, размеры облачных структур, толщина пограничного слоя атмосферы (ПСА) и др. находятся в соответствии с результатами [7]. Максимальные значения турбулентных потоков явного и скрытого тепла достигали 320 и 170 Вт/м², соответственно.

Существенный прогресс в получении количественных характеристик ХВ, их структуры и эволюции был достигнут на основе анализа спутниковой информации в различных участках спектра – особенно полученных с нового поколения спутников. Спутниковые изображения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах длин волн дают представление о поле облачности в широком диапазоне пространственных масштабов – от нескольких тысяч км до нескольких сотен метров, позволяют оценивать температуру подстилающей поверхности, высоту облаков. По измерениям в микроволновом диапазоне могут быть восстановлены поля приводного ветра, паросодержания атмосферы и водозапаса облаков, выявлены зоны осадков.

Особенности гидрометеорологического режима бассейна

Берингово море расположено между двумя континентами, Азией и Северной Америкой. Сезонный термический контраст между азиатским континентом и прилегающими тихоокеанскими водами определяют систему циркуляции атмосферы и погоду в Беринговом море и, в конечном счете, климатические характеристики района.

В холодный период над азиатским континентом и северными районами Тихого океана преобладают два основных центра действия атмосферы – азиатский антициклон и алеутская депрессия. Формированию и развитию антициклона способствует охлаждение континента. Уже к ноябрю это барическое образование становится сформировавшимся центром действия атмосферы, крайне устойчивым на протяжении всего холодного периода [2]. Углублению алеутской депрессии способствуют атмосферные циклоны, которые, начиная с осеннего периода, регулярно проникают на север с умеренных и тропических широт. В результате на протяжении зимнего периода над Беринговым морем преобладает ветер северных румбов, регулярно приводящий к адвекции холодного арктического воздуха.

Арктический фронт, отделяющий арктический воздух от морской воздушной массы, на протяжении всего года расположен параллельно береговой черте, однако зимой он смещается южнее в Берингово море. Циклоническая активность вдоль арктического фронта приводит к интенсивному вторжению арктической воздушной массы из Северного Ледовитого океана. Такие холодные вторжения сопровождаются штормовым ветром и вызывают резкое похолодание над морем.

Данные

Изучение структуры и характеристик ХВ над Беринговым морем проводилось по данным, полученным с нескольких спутников с 2002 г. по 2008 г. Для их интерпретации и валидации

использовались измерения океанических буев и показания островной станции радиозондирования атмосферы.

Детальная мезомасштабная структура облачности исследовалась по видимым и ИК-изображениям, полученным спектрорадиометром MODIS со спутников Terra и Aqua (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>). Основным источником данных о ветре были карты, построенные по данным скаттерометра SeaWinds со спутников QuikSCAT и ADEOS-II с пространственным разрешением 25 км (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/). Полная масса водяного пара в атмосфере Q и водозапас облаков V рассчитывались из яркостных температур T_y , измеренных микроволновыми радиометрами AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System) и AMSR, установленными на спутниках Aqua и ADEOS-II, соответственно, а также радиометром SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), установленным на спутниках министерства обороны США DMSP F13 – F15 (). Обработка T_y велась по алгоритмам, настроенным для высоких широт [8, 9].

Микроволновый радиометр AMSR-E зондирует систему атмосфера-подстилающая поверхность на шести частотах $\nu = 6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5$ и 89.0 ГГц на горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризациях. Ширина полосы обзора AMSR-E - 1450 км, сканирование по конусу, угол визирования - 55° . Максимальное пространственное разрешение составляет 5 км на 89.0 ГГц, 15 км на 36.5 ГГц и 25 км на 18.7 и 23.8 ГГц [10]. Радиометр AMSR аналогичен AMSR-E, но имеет два дополнительных канала на частотах 50.3 и 52.8 ГГц [11]. К сожалению, спутник ADEOS-II вышел из строя в октябре 2003 г.

Радиометра SSM/I выполняет измерения на $\nu = 19.35, 37.0$ и 85.5 ГГц на В- и Г-поляризациях, а на $\nu = 22.235$ ГГц - только на В-поляризации. Ширина полосы обзора SSM/I - 1400 км. Пространственное разрешение на низкочастотных каналах 19.35, 22.235 и 37.0 ГГц составляет 25 км, а на $\nu = 85.5$ ГГц - 12.5 км. В период исследования измерения SSM/I выполнялись с трех спутников, что позволило детально исследовать временную эволюцию ХВ над Беринговым морем по полям яркостных температур и по восстановленным по ним полям Q и V .

В качестве дополнительной информации использовались измерения буев в открытой части моря, из которых с дискретностью 1 час были получены температура и влажность воздуха, скорость и направление приводного ветра, атмосферное давление на высоте 10 м от морской поверхности, а также температура поверхности воды на горизонте 1 м (<http://www.ndbc.noaa.gov/>); вертикальные профили гидрометеорологических характеристик, взятые из данных ежедневного радиозондирования атмосферы в 00 и 12 Гр. со станции на о. Прибылова (57.15° с.ш., 170.21° з.д.), предоставленные университетом штата Вайоминг (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>); карты приземного анализа японского метеорологического анализа (<http://noc.poi.dvo.ru/weather/www.hbc.co.jp/>), а также поля геопотенциальной высоты и температуры атмосферы на изобарических поверхностях 1000, 850 и 700 мб, полученные из реанализа NCEP/NCAR. (<http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>).

Структура и характеристики холодных вторжений

Из анализа полей ветра, спутниковых видимых и ИК-изображений и измерений океанических буев в сроки, близкие к спутниковому зондированию, а также данных радиозондирования следует, что в холодные периоды (ноябрь – март) 2002-2008 гг. над Беринговым морем наблюдалось 48 ХВ с пространственным масштабом, соизмеримым с размером бассейна. Часто вторжения регистрировались в тылу синоптических циклонов, центры которых, как правило, располагались над зал. Аляска и над восточной частью Алеутской гряды. Время существования ХВ менялось от нескольких часов до нескольких суток. Наиболее продолжительные вторжения отмечались в феврале. Количество дней с холодными вторжениями в 2002-2005 составляло примерно 12-15, а начиная с 2005 – 2006 гг., резко возрастает (рис. 1). Так с 1 ноября 2007 г. по 31

марта 2008 г. суммарная продолжительность холодных вторжений составляла 39,5 дней - 26% от продолжительности холодного периода.

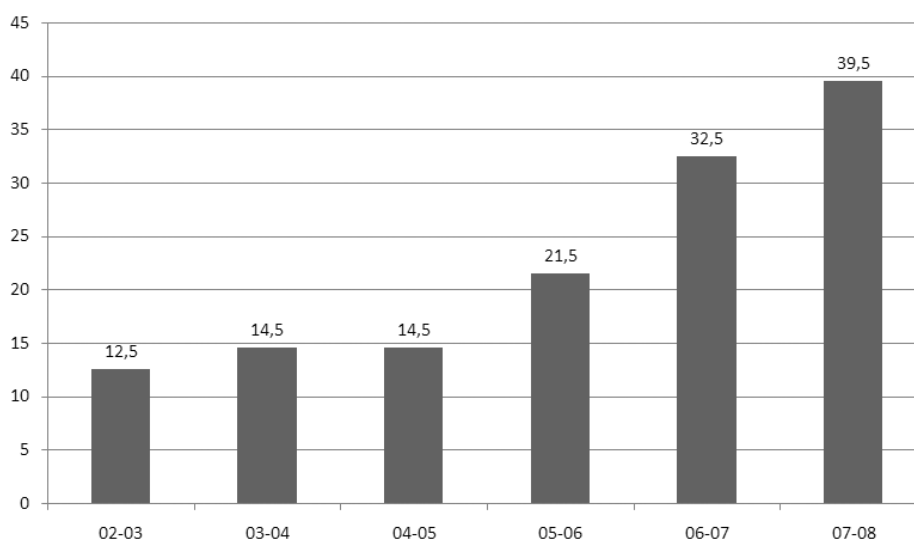


Рис. 1. Продолжительность (в днях) холодных вторжений над Беринговым морем в 2002-2008 гг.

При холодных вторжениях над Беринговым морем дуют ветры северных румбов со скоростью 10 – 25 м/с, что следует из измерений океанологических буев, спутниковых скатерометров и данных радиозондирования атмосферы. От кромки льда вниз по потоку арктического воздуха развиваются конвективные облачные гряды и ячейки, надежно регистрируемые на видимых спутниковых изображениях. Типичные значения паросодержания атмосферы в зонах холодных вторжений составляют 1-3 кг/м² у границы суши или у кромки льда и возрастают до 5-7 кг/м² на расстоянии 300-500 км вниз по потоку. Облачность на видимых и/или ИК-изображениях появляется или на границе суша/лед – море или на некотором расстоянии от границы, что определяется температурой и влажностью холодной воздушной массы, скоростью ветра и температурой моря. Значения водозапаса облаков возрастают по мере продвижения арктического воздуха над открытой поверхностью моря от минимально регистрируемых величин до значений, как правило, не превышающих 0.1-0.15 кг/м². Одновременно увеличивается расстояние между облачными грядами (длине волны Λ) и размер ячеек D . Толщина конвективного слоя атмосферы H возрастает от 300 до 2400 м, что следует из анализа радиозондовых данных. Из анализа вертикальных профилей температуры и относительной влажности атмосферы также следует, что в районе станции нижняя граница облачности h_H располагалась на высоте 200-700 м над уровнем моря, а высота верхней границы h_B – на 800-2200 м. Толщина облачности в конвективных грядах варьировала примерно от 300-600 м до 1500-1800 м, что при постоянном профиле влажности внутри слоя облачности дает значения влажности примерно 0.03-0.15 г/м³. Приведенные оценки характеристик атмосферы соответствуют полученным при самолетных исследованиях [4, 7], а также данным моделирования [5, 6] и типичны для ХВ.

Холодное вторжение 1-7 февраля 2003 г.

Рассмотрим результаты совместного анализа различных видов данных, полученных во время интенсивного ХВ над Беринговым морем с 1 по 7 февраля 2003 г. Из карт приземного анализа японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency - JMA) следует, что погодные условия над морем на протяжении всего периода определялись двумя барическими образованиями: азиатским антициклоном и алеутской депрессией, подпитываемой приходящими с юга циклонами. В начальный период адвекция арктической воздушной массы определялась сместившейся на юг алеутской депрессией. Центр сместился в район центральной части

алеутской гряды, где атмосферное давление составило 987 мб. В это время гребень азиатского антициклона, распространился над северо-восточной частью Азии. Из сопоставления данных о состоянии моря, полученных непосредственно до и сразу после вторжения следует, что перемещение арктического воздуха над морем привело к выхолаживанию большей части бассейна и к увеличению площади ледяного покрова примерно на 10%.

Изменения скорости ветра и температуры атмосферы на высоте 10 м от поверхности, построенные по данным океанического буя (46035, 57.07°с.ш., 177.75°з.д.), позволяют выделить три стадии ХВ (рис. 2). На начальной стадии (1-3 февраля) на фоне резкого понижения температуры (около 4°С/сут) скорость ветра возрастала от 11 до 15 м/с. Наиболее интенсивная стадия наблюдалась с 4 по 5 февраля, когда адвекция холодного воздуха на юг усилилась. Это было обусловлено углублением алеутской депрессии, что, в свою очередь, было вызвано синоптическим циклоном с давлением в центре 978 мб, располагавшимся у юго-восточной части алеутской гряды. В дальнейшем интенсивность вторжения постепенно спадала; скорость ветра понизилась до 5 м/с и меньше.

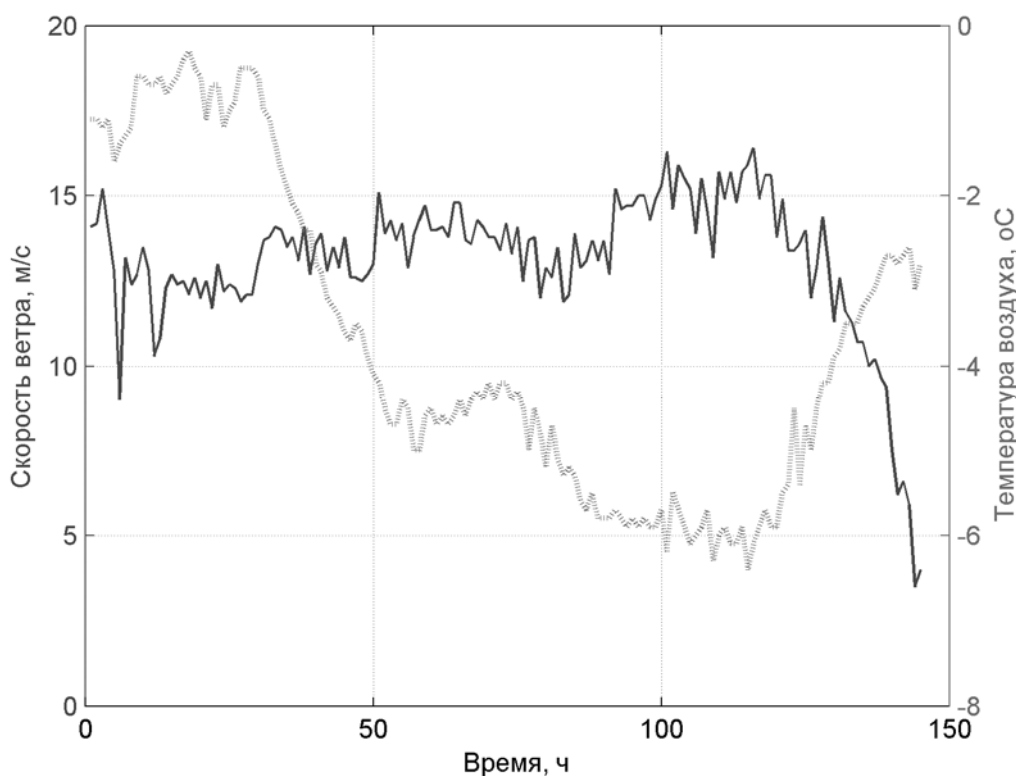


Рис. 2. Изменение скорости приводного ветра (сплошная линия) и температуры воздуха у поверхности (пунктирная линия) за время холодного вторжения с 12:00 Гр. 1 февраля до 12:00 Гр. 7 февраля, 2003 г. по измерениям океанического буя NDBC No. 46035 (57.07° с.ш., 177.75° з.д.)

Конвективные облачные гряды и открытые ячейки, сформировавшиеся в пограничном слое атмосферы в результате интенсивного взаимодействия океана и атмосферы, отчетливо различимы на серии видимых и ИК-изображений, полученных спектрометрией MODIS со спутников Aqua и Terra, начиная с 1 февраля. На рис. 3 приведено видимое изображение гряд и ячеек, полученное 4 февраля в 16:25 Гр. Расстояние между грядами Λ возрастало от 1-2 км у кромки льда до 10-11 км на расстоянии 200 – 400 км. В районе станции радиозондирования $\Lambda = 9$ км. Толщина пограничного слоя атмосферы по данным радиозондирования за 5 февраля составила 1000 м., из которых 800 м занимала облачность. Гряды постепенно трансформировались в открытые ячейки на еще больших расстояниях. Размер ячеек D постепенно увеличивался от 4-6 до 25-35 км.

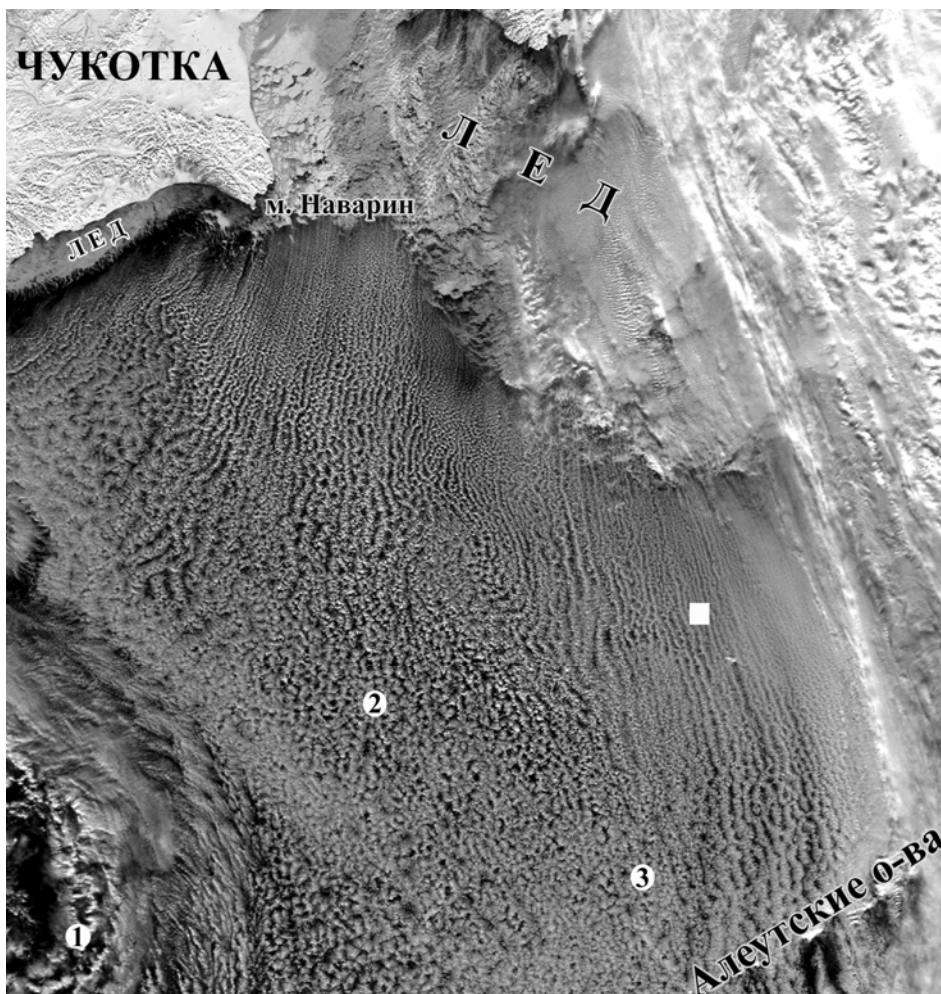


Рис. 3. Облачные гряды и ячейки во время холодного вторжения над Беринговым морем на видимом изображении, полученном спектрометрией **MODIS** со спутника **Aqua** в 00:25 Гр. 5 февраля 2003 г. Белыми кругами обозначены положения океанических буев **NDBC** (1- №46070, 2 - №46035, 3 - №46073); квадратом – станции радиозондирования

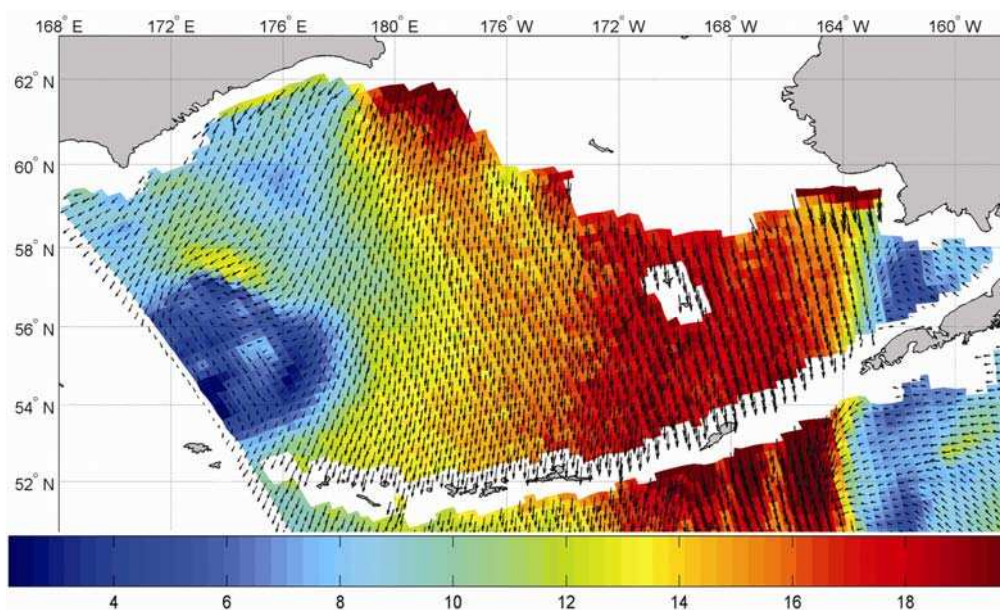


Рис. 4. Поле приводного ветра, восстановленное по данным скаттерометра **SeaWinds** со спутника **QuikSCAT**, полученным в 16:35 Гр. 4 февраля 2003 г. Цветовая шкала – скорость ветра в м/с

Во время наиболее интенсивной стадии холодного вторжения над большей частью свободной ото льда поверхности моря по данным скатерометра SeaWinds наблюдался северный ветер со скоростью 10 – 20 м/с (рис. 4). У кромки льда в отдельных местах скорость ветра превышала 20 м/с, и потоки тепла и влаги из океана в атмосферу достигали максимума. Значения паросодержания атмосферы, восстановленные по яркостным температурам $T_{я}$, измеренным радиометром AMSR-E, постепенно возрастают от 1–2 кг/м² у кромки льда до 7 – 8 кг/м² в районе Алеутской гряды (рис. 5), что обусловлено активным испарением и конвективным переносом влаги от поверхности океана. На расстоянии 180 км от кромки льда температура воздуха у поверхности по данным радиозондирования составляла $-(8 - 10)^{\circ}\text{C}$. Теплообмен за счет турбулентных потоков явного и скрытого тепла достигал здесь 600 Вт/м² (по данным Japanese Ocean Flux data sets with Use of Remote sensing Observations - J-OFURO2, <http://dtsv.scc.u-tokai.ac.jp/j-ofuro2/>),

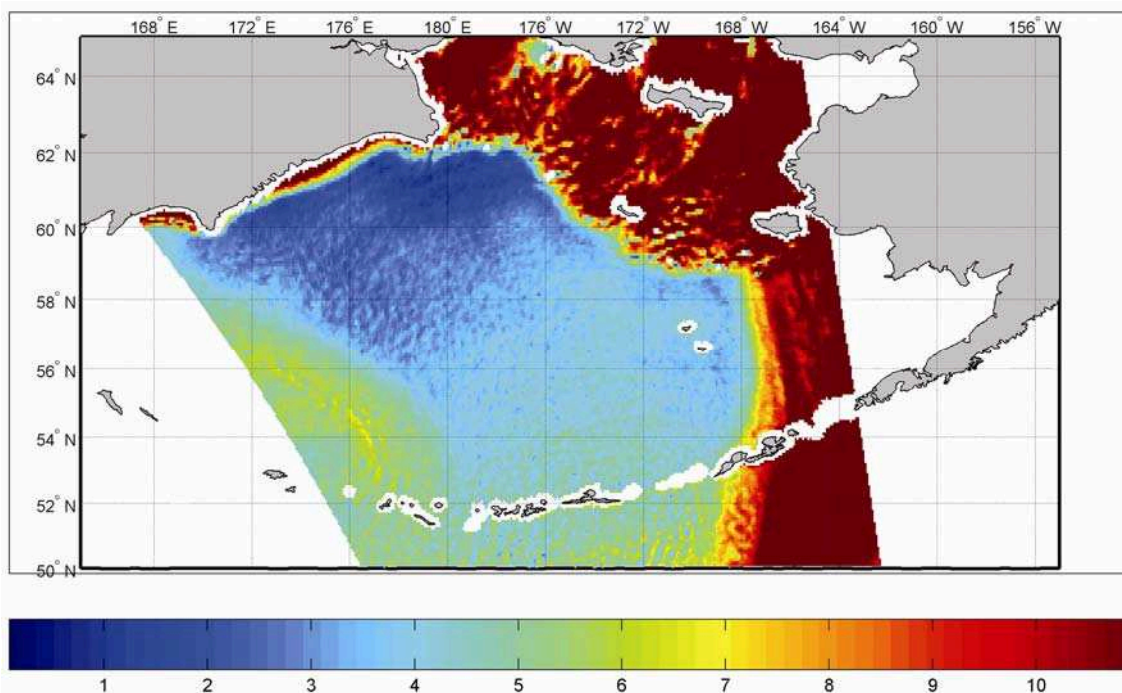


Рис. 5. Поле паросодержания атмосферы по измерениям радиометра AMSR-E со спутника Aqua в 00:25 Гр. 5 февраля 2003 г. Цветовая шкала – полная масса водяного пара в кг/м²

Заключение

Из анализа сопряженных по пространству и времени спутниковых и контактных измерений следует возможность детального количественного исследования эволюции ХВ, а также структуры и характеристик организованной мезомасштабной конвекции в пограничном слое атмосферы над океаном.

Вторжения арктической воздушной массы сопровождаются сильным ветром (10-25 м/с) и интенсивным взаимодействием океана и атмосферы. Содержание водяного пара в толще атмосферы мало (1-8 кг/м²), а значения водозапаса облаков, как правило, не превышают 0.2 кг/м². В результате интенсивного тепло- влагообмена вниз по потоку арктического воздуха возникают конвективные облачные гряды, расстояние между которыми возрастает от 0,7-1 до 12-15 км. Гряды трансформируются в открытые и закрытые ячейки, размер которых D варьирует от 1-2 до 50-60 км. Из статистического анализа массива спутниковой и контактной информации следует, что количество дней, на протяжении которых наблюдались ХВ, заметно увеличивается, начиная с 2005 г.

Недостаточная изученность и предполагаемое увеличение дней с холодными вторжениями [1] служат важными аргументами для продолжения их исследования над дальневосточными морями, в частности, для оценки связи ХВ с изменением климата в северо-западной части Тихого океана. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 06-05-96076-р_восток_a и 08-05-99109-р_офи.

Литература

1. Kolstad E.W., Bracegirdle T.J. Marine cold-air outbreaks in the future: an assessment of IPCC AR4 model results for the Northern Hemisphere // *Climate Dynamics*, 2008. Vol. 30. №7-8. P. 871–885.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей / Под ред. Б. Х. Глуховского, Н. П. Гонтарева, Ф. С. Терзиева. - С-П.: Гидрометеоиздат., 1998. Т. IX. - 300 с.
3. Vavrus S., Walsh J.E., Chapman W.L., Portis D. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming // *Intern. J. of Climatology*. 2006. Vol. 26. №9. P. 1133–1147.
4. Brümmner B. Roll and cell convection in wintertime arctic cold-air outbreaks // *J. Atmospheric Sciences*. 1999. Vol. 56. №15. P. 2613-2636.
5. Liu A.Q., Moore G.W.K., K. Tsuboki, I.A. Renfrew. A high-resolution simulation of convective roll clouds during a cold-air outbreak // *Geophys. Res. Letters*. 2004. Vol. 31. №3. L03101.
6. Liu A.Q., Moore G.W., Tsuboki K., Renfrew I.A. The effect of the sea-ice zone on the development of boundary-layer roll clouds during cold air outbreaks // *Boundary-Layer Meteorology*. 2006. Vol. 118. №3. P. 557-581.
7. Renfrew I. A., Moore G. W. An extreme cold-air outbreak over the Labrador Sea: Roll vortices and air-sea interaction // *Mon. Weather Rev.* 1999. Vol. 127. №10. P. 2379 – 2394.
8. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA, ADEOS-II // *Исслед. Земли из космоса*, 2006. №4. С. 34-41.
9. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // *Radio Science*. 2003. Vol. 38. №4, 8065.
10. AMSR-E Data Users Handbook, 4th Edition, JAXA, 2006.
11. ADEOS-II Data Users Handbook, Third Edition, JAXA, 2006.

Cold-air outbreaks over the Bering Sea: Satellite multisensor analysis

M.K. Pichugin, L.M. Mitnik

*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Vladivostok, 690041, Russian Federation
E-mail: pichugin@poi.dvo.ru*

The 48 Cold-Air Outbreaks (CAOs) were revealed in 2002-2008 by the usage of satellite and ground measurements. They covered a major part of the Bering Sea. Their detailed analysis was carried out. Duration of CAOs varied from several hours to several days. The most long-term outbreaks were observed in February. Northern winds with surface wind speed of 10 – 25 m/s were dominated during CAOs. Convective cloud rolls were observed downstream from the ice edge. The distance between the neighboring rolls (wavelength) increased from 0.7-1 to 12-15 km as the distance from the ice edge increased. Further rolls were transformed into the open and closed convective cells, size of which ranged from 1-2 to 50-60 km. Typical values of total water vapor content were 1 – 7 kg/m² and increased downstream. The results of the multisensor analysis of evolution of the intense cold-air outbreak on 1-7 February 2003 are presented.

Keywords: air-sea interaction, cold-air outbreak, mesoscale convective rolls and cells, satellite meteorology, Aqua AMSR-E, QuikSCAT SeaWinds, Bering Sea.