

Межгодовая изменчивость характеристик холодных вторжений над Японским морем

М.К. Пичугин¹, Д.Г. Чечин²

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия*

E-mail: pichugin.mk@gmail.com

²*Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*

E-mail: chechin@ifaran.ru

В работе исследуется межгодовая изменчивость интенсивности холодных вторжений (*XВ*) над Японским морем (*ЯМ*) с использованием данных спутникового дистанционного зондирования и реанализа высокого разрешения за период с 1979 г. по 2016 г. На основе спутниковых микроволновых измерений вектора приводного ветра и видимых/инфракрасных изображений облачности, полученных за 16 холодных сезонов (ноябрь–март) 2000–2016 гг., предложены критерии регистрации *XВ* над *ЯМ*. Анализ характеристик *XВ* показал, что в 36% случаев продолжительность вторжений (*D*) не превышает 24 часов ($D < 1$ сут.). Около 30% из них в стадии максимального развития сопровождаются штормовым ветром (≥ 20 м/с), обуславливающим интенсивный турбулентный энергомассоперенос через морскую поверхность. Выявлена статистическая взаимосвязь между повторяемостью *XВ* и межгодовыми колебаниями температуры воздуха (T_a) и суммарного (явный + скрытый) турбулентного потока тепла над морской поверхностью. Наиболее тесная обратная связь T_a и количества вторжений (коэффициент корреляции $-0,86$) отмечается над континентальной частью Дальнего Востока с координатами центра $47,5^\circ$ с.ш., $135,5^\circ$ в.д. В этом районе на протяжении всего периода исследования выделяется колебание T_a с периодом, близким к 10 годам, что позволяет выдвинуть гипотезу о квазидесятилетней цикличности активности *XВ* над Японским морем.

Ключевые слова: холодные вторжения, Японское море, спутниковые измерения, индикация, межгодовая изменчивость, температура воздуха, поток тепла

Одобрена к печати: 22.09.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-238-248

Введение

Холодным вторжением (*XВ*) называют систему атмосферной циркуляции, приводящую к быстрой адвекции полярной/арктической воздушной массы в более низкие широты. Над сушей такое метеорологическое явление сопровождается резким понижением температуры воздуха у поверхности и возникновением экстремальных погодных условий в холодный сезон года. Вторжения над морской поверхностью характеризуются штормовым ветром и волнением, образованием и дрейфом льда, интенсивным переносом тепла и влаги из океана в атмосферу.

Известно, что *XВ* являются особенностью метеорологического режима Японского моря (*ЯМ*), существенно влияющей на турбулентный теплообмен между океаном и атмосферой в зимние месяцы. Во время вторжений суммарный турбулентный теплоперенос в атмосферу может достигать $1000\text{--}1200$ Вт/м² (Jensen et al., 2011), что приводит к интенсификации процессов трансформации водных и воздушных масс и существенно влияет на региональную циркуляцию в море (Seung, Yoon, 1995; Kawamura, Wu, 1998). Вместе с тем продолжительные вторжения могут привести к заметному увеличению толщины верхнего перемешанного слоя в океане с последующей задержкой сроков весеннего цветения фитопланктона. В работах (Yamada et al., 2004; Onitsuka et al., 2007) отмечено, что в годы аномально высокой активности *XВ* биопродуктивность *ЯМ* может снижаться.

Целью данной работы является исследование межгодовой изменчивости интенсивности холодных вторжений над Японским морем с использованием данных спутниковых измерений и реанализа нового поколения National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis (*NCEP-CFSR*) за 37 холодных сезонов (ноябрь–март) 1979–2016 гг. Анализ количества и продолжительности *XВ* выполнен по спутниковым данным для 16 холодных сезонов, начиная с 2000 г., когда стали доступны измерения со спутника *Terra*.

Данные

Анализ пространственно-временной изменчивости направления и скорости приводного ветра (вектора ветра - \vec{W}) во время *XВ* над ЯМ выполнен с использованием спутниковых микроволновых пассивных и активных измерений. Ежесуточные поля \vec{W} , рассчитанные из измерений поляризационного радиометра WindSat (спутник Coriolis) по усовершенствованным алгоритмам, взяты с сайта компании Remote Sensing System (<ftp://ftp.remss.com/windsat>) в узлах регулярной сетки $0,25 \times 0,25$ градусов. Измерения вектора ветра скаттерометрами SeaWinds (со спутника QuikSCAT) и ASCAT (со спутников MetOp-A, B) получены с пространственным разрешением 25×25 км из архива лаборатории Jet Propulsion Laboratory (<ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/>). Объединенный массив содержит пространственные измерения \vec{W} над Японским морем с дискретностью от 2 до 6 раз в сутки (в зависимости от количества спутников на орбите). Это позволило учесть мезомасштабную изменчивость характеристик ветра, связанную с прибрежной орографией, заметно влияющей на ветровой режим западной части моря зимой, и полярными мезоциклонами, регулярно наблюдающимися в холодный период года.

Анализ эволюции пространственной структуры облачности над ЯМ выполнен по видимым и инфракрасным (ИК) изображениям с разрешением 1 км, полученным по измерениям спектрорадиометров MODIS со спутников Aqua и Terra (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>).

Сформированный массив данных включает спутниковые оптические и микроволновые измерения за 16 холодных сезонов (ноябрь–март), начиная с 2000 г., когда стали доступны измерения со спутника *QuikSCAT*. Этот массив позволил изучить синоптические и мезомасштабные особенности эволюции *XВ*, в том числе с продолжительностью менее суток.

Ежечасные поля температуры воздуха (T_a) и суммарного (явный + скрытый) турбулентного потока тепла (Q_{S+LE}) у поверхности взяты из реанализа National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis (*NCEP-CFSR*) в узлах регулярной сетки $0,312^\circ \times 0,312^\circ$ за 1979–2010 гг. и $0,205^\circ \times 0,204^\circ$ за 2011–2016 гг. *NCEP-CFSR* является реанализом нового поколения с высоким пространственным и временным разрешением (разрешение модели 34 км), усовершенствованной ассимиляцией большего количества

спутниковых измерений (включая пассивные и активные измерения скорости и направления приводного ветра) и улучшенной параметризацией процессов в пограничном слое атмосферы (Saha et al., 2010).

Регистрация холодных вторжений

По результатам анализа характеристик *XВ* (Пичугин, Митник, 2009; Mitnik et al., 2011; Chechin, Pichugin, 2015), основанного на данных спутникового зондирования, в данном исследовании предложены критерии для регистрации *XВ* над *ЯМ*. Во-первых, вторжения всегда сопровождаются мезомасштабной упорядоченной конвекцией над морской поверхностью, которая регистрируется на спутниковых видимых и инфракрасных изображениях в виде облачных гряд и ячеек. Эта конвекция проявляется и в упорядоченных вариациях приводного ветра, рассчитанного по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (Радиолокация..., 1990; Mourad, Walter, 1996). Во-вторых, адвекция холода с континента должна сопровождаться усилением *СЗ* приводного ветра со скоростью, превышающей некоторое пороговое значение W_0 , которое может меняться в зависимости от температуры и влажности воздуха. С учетом выводов работ (Mitnik, Mitnik, 2008; Chechin, Pichugin, 2015; Похил, 1985) и результатов анализа эволюции *XВ* над *ЯМ* в полях облачности и приводного ветра установлено, что облачные гряды, как правило, возникают при $|\bar{W}|$ от 10 м/с и более. В-третьих, площадь, охватываемая вторжением, должна быть больше 50% площади *ЯМ*. На *рис. 1* представлен пример *XВ* над *ЯМ*, зарегистрированного по спутниковым данным.

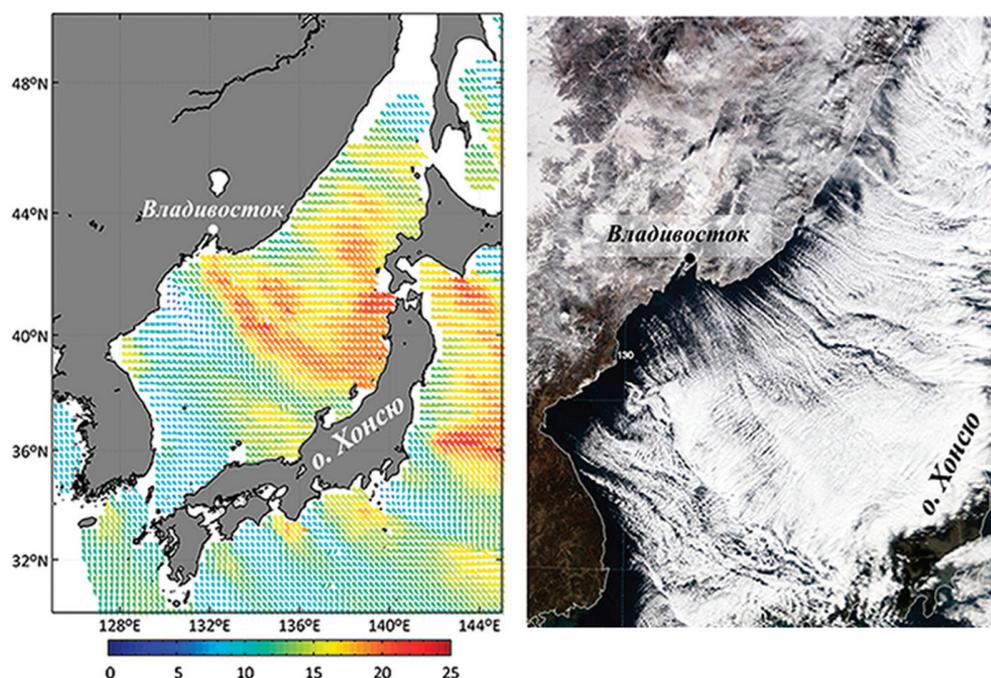


Рис. 1. Холодное вторжение над Японским морем: поле ветра по измерениям скаттерометра *SeaWinds* (спутник *QuikSCAT*) (слева), видимое изображение, полученное спектрорадиометром *MODIS* со спутника *Aqua*

Межгодовая изменчивость характеристик ХВ

За 16 холодных сезонов (ноябрь–март) с 2000 г. по 2016 г. было зарегистрировано 403 холодных вторжения над ЯМ. Как правило, вторжения возникали в тылу внетропических циклонов синоптического масштаба, перемещавшихся вдоль Японских островов со скоростью более 50–60 км/ч в северную часть моря или к СВ побережью о. Хонсю. В отдельных случаях быстрая адвекция холода с континента определялась обширной циклонической системой над Курильскими островами и открытой частью Тихого океана.

Продолжительность ХВ (D) над ЯМ существенно варьировалась в диапазоне от 0,5 до 7 сут. При этом плотность распределения продолжительности вторжений (f) надежно описывается экспоненциальной функцией $f(D) = 227e^{-0,89D}$ с максимумом (146 случаев) для D менее 1 сут. (рис. 2). Важно подчеркнуть, что в более ранних исследованиях, например (Dogman et al., 2004), такие непродолжительные вторжения не анализировались, однако именно они являются наиболее типичными для Японского моря. Около 30% ХВ с D менее суток в стадии максимального развития сопровождалось штормовым ветром, а значит и интенсивным турбулентным энерго- и массопереносом через морскую поверхность.

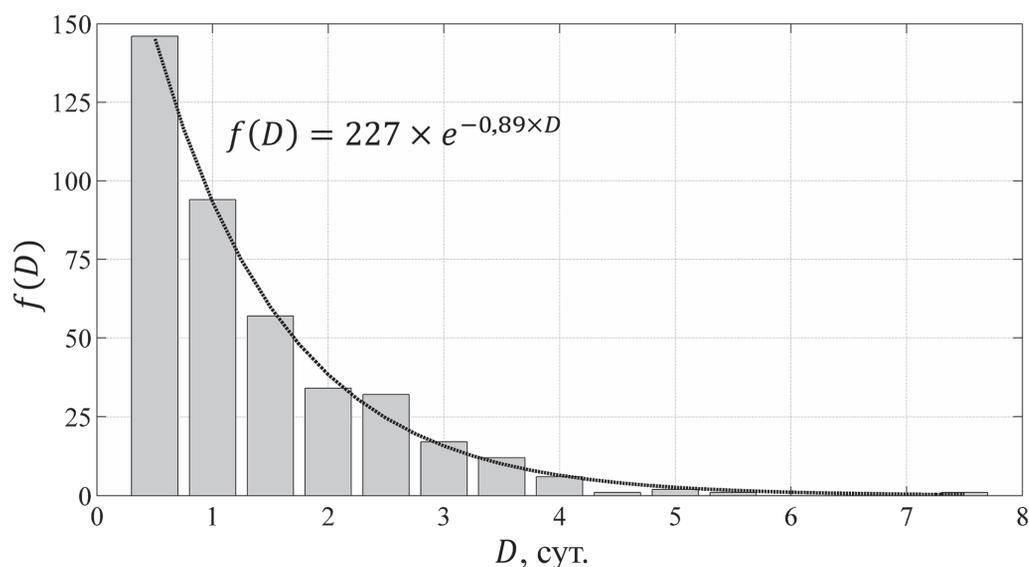


Рис. 2. Плотность распределения продолжительности холодных вторжений над Японским морем – $f(D)$ за 16 холодных сезонов 2000–2016 гг. Пунктирная линия соответствует экспоненциальной функции, аппроксимирующей распределение

На рис. 3 представлена диаграмма межгодовой изменчивости повторяемости ХВ над морем в аномалиях относительно среднего (около 25 вторжений) за 16 лет. Максимальное количество вторжений наблюдалось в холодный сезон 2000/2001 гг., когда более чем в 50% случаев регистрировались экстремальные погодные условия со штормовым ветром ($W_{\text{макс}} \geq 20$ м/с). При этом в работе (Talley et al., 2003), основанной на судовых измерениях в феврале 2001 г., показано, что у континентального склона залива Петра Великого происходила глубокая конвекция с формированием значительных объемов донных вод, распространившихся в Центральной котловине моря на глубинах 3000–3300 м.

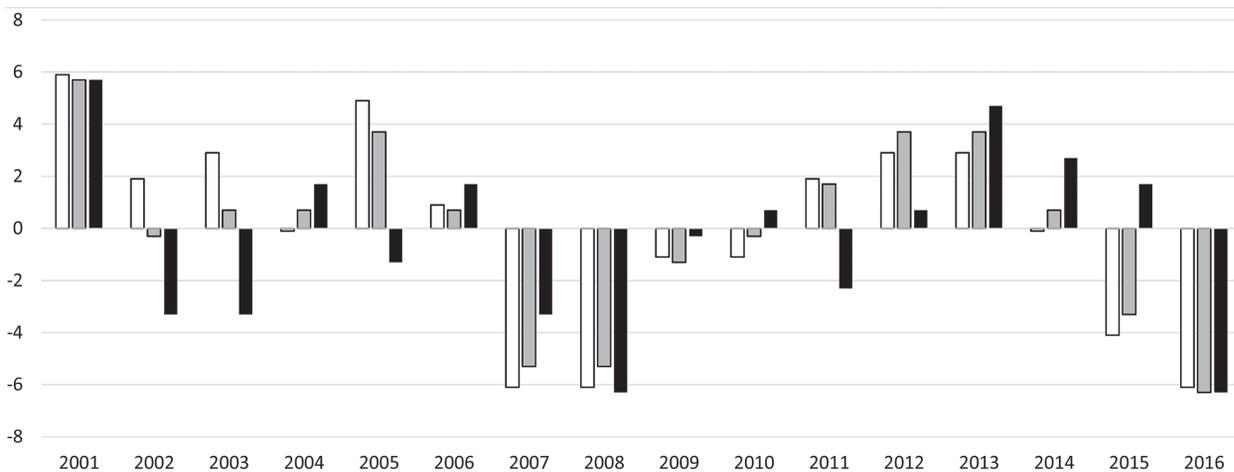


Рис. 3. Межгодовая изменчивость аномалий количества холодных вторжений над Японским морем для 16 холодных сезонов с 2000/2001 по 2014/2016 гг. Белые, серые и черные столбики соответствуют аномалиям вторжений с максимальной скоростью ветра у морской поверхности более 10, 15 и 20 м/с соответственно

Период 2005–2016 гг. характеризуется ярко выраженным колебанием повторяемости ХВ с максимумами в 2004/2005 и 2012/2013 гг. и минимумами в 2007/2008 и 2015/2016 гг. В более ранних исследованиях (Woo et al., 2012; Isobe, Beardsly, 2007; Park et al., 2011; Cui, Senjuu, 2010) отмечено, что интенсивность холодных вторжений (частота, продолжительность, скорость ветра) как над Японским морем, так и Северо-Восточной Азией подвержена значительной межгодовой изменчивости, отражая климатические изменения характеристик в основных центрах действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона (Сибирского максимума и Алеутской депрессии) на этих временных масштабах. Существенную роль авторы отводят арктическому колебанию (АО), проявляющемуся в вариациях разности атмосферного давления в высоких и умеренных широтах Северного полушария (Thompson, Wallace, 1998) и отражающему интенсивность западного переноса.

Взаимосвязь между повторяемостью ХВ и параметрами системы «океан–атмосфера»

Следует отметить, что используемые в данной работе спутниковые оптические и микроволновые измерения получены лишь для 16 холодных сезонов и недостаточно репрезентативны для анализа долгопериодной изменчивости характеристик ХВ над ЯМ. Однако временной ряд может быть расширен за счет привлечения параметров системы «океан–атмосфера», чувствительных к повторяемости ХВ. Так, в исследованиях (Compo et al., 1999; Jhun, Lee, 2004) показано, что синоптические и сезонные изменения интенсивности Восточно-Азиатского зимнего муссона проявляются в соответствующих колебаниях приземной температуры воздуха. Очевидно, аналогичная взаимосвязь существует и для вторжений над ЯМ. На рис. 4 представлены пространственные распределения ко-

эфициента корреляции (R) между количеством XB над $ЯМ$, температурой воздуха (T_a) и суммарным (явный + скрытый) турбулентным потоком тепла (Q_{S+LE}) у поверхности за каждый холодный сезон с 2000 г. по 2016 г. Из *рис. 4а* видно, что над всем $ЯМ$ повторяемость XB и T_a имеет статистически значимую обратную взаимосвязь ($R \leq -0,5$), усиливающуюся к северо-западному побережью и обширной континентальной области. Наиболее тесная корреляция ($|R|$ больше 0,80) отмечается над континентальной частью Дальнего Востока с координатами центра $47,5^\circ$ с.ш., $135,5^\circ$ в.д. Низкие значения $|R| = 0,5-0,55$ регистрируются в северной части $ЯМ$ и районе локальной зоны конвергенции к востоку от Восточно-Корейского залива (Nagata et al., 1986), где в холодный сезон регулярно формируются полярные мезоциклоны (Yanase et al., 2016).

Высокая корреляция ($R \geq 0,8$) между количеством вторжений и Q_{S+LE} (*рис. 4б*) выделяется в центральной части $ЯМ$ (севернее 40° с.ш.). Эта зона находится внутри циклонического круговорота субарктической части моря, где редко наблюдаются фронты ТПО (Park et al., 2007), и совпадает с зоной минимума турбулентного теплообмена, выделенной в работе (Пичугин, Пономарев, 2013).

Высокая статистически значимая взаимосвязь количества XB и потоков тепла над большей частью $ЯМ$ количественно подтверждает определяющую роль XB в режиме турбулентного теплообмена моря в холодный период года. Однако в районе Восточно-Корейского залива и прилегающей с востока открытой части бассейна такая взаимосвязь проявляется слабо ($R \leq 0,3$). Вероятно, вклад океанических процессов в изменчивость Q_{S+LE} в этом районе доминирует, что требует дополнительного рассмотрения.

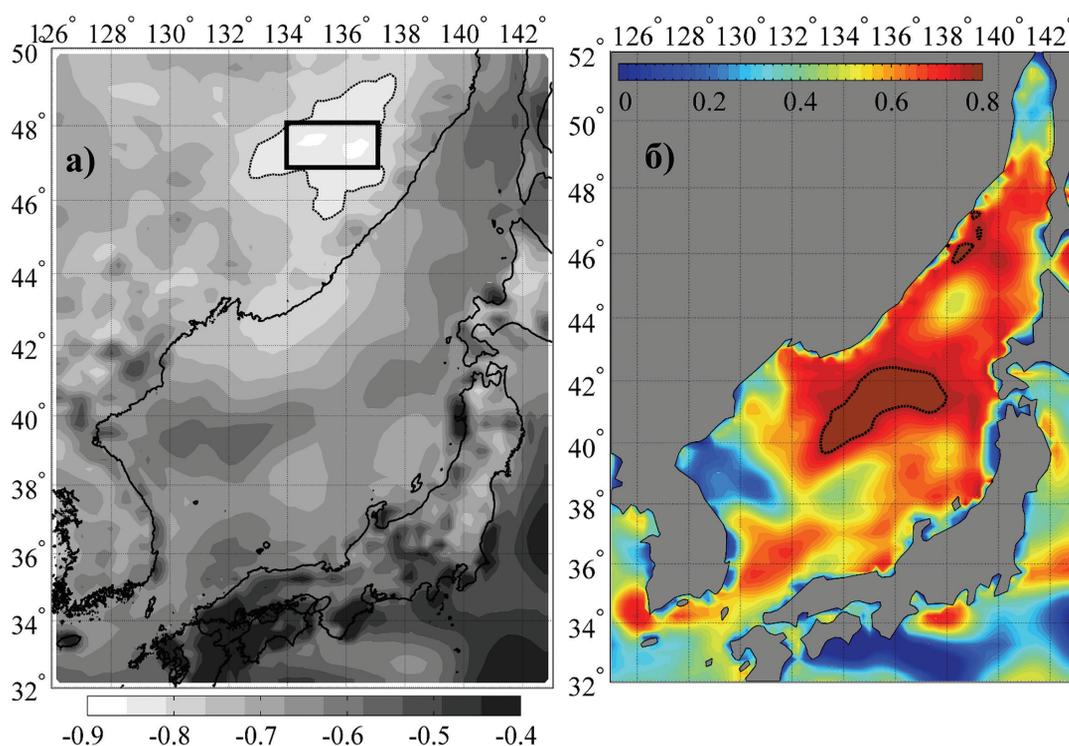
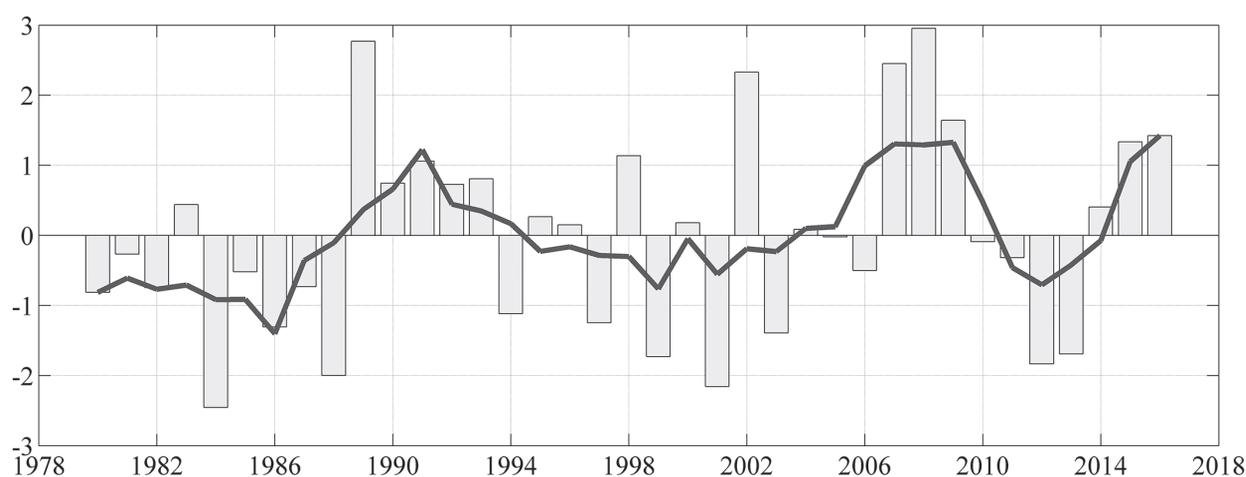


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициента корреляции (R) между количеством XB над $ЯМ$ и температурой воздуха у поверхности (а) и суммарным (явный + скрытый) турбулентным потоком тепла (б), осредненными за каждый холодный сезон 2000–2016 гг. На фрагментах рисунка пунктирной линией выделены области с $|R| \geq 0,8$

Межгодовые колебания температуры воздуха у поверхности Земли

Рассмотрим межгодовую изменчивость аномалии T_a за 37 холодных сезонов 1979–2016 гг. над областью, где ее корреляция с повторяемостью XB высока (на *рис. 4а* эта область выделена прямоугольником) (*рис. 5*). Мы предполагаем, что для выбранного периода эта взаимосвязь сохраняется. Из рисунка видно, что временной ряд аномалий T_a , характеризующий повторяемость XB , содержит колебание с периодом, близким к десятилетнему, что наиболее выражено в вариациях пятилетнего скользящего среднего (черная кривая) с 2006 г. по 2016 г. Примечательно, что наблюдаемая смена фазы колебания T_a с отрицательной (1987/1988 гг.) на положительную (1988/1989 гг.) определена и в работах (Wu, Wang, 2002; Cui, Senju, 2010) как период резкого перехода арктического колебания (AO) в положительную фазу. Эта особенность, вероятно, отражает обратную статистическую взаимосвязь между AO и интенсивностью сибирского максимума (Gong et al., 2001), во многом определяющего активность зимнего муссона над $ЯМ$.

Также следует отметить тенденцию к уменьшению амплитуды и продолжительности стадии отрицательной аномалии T_a за исследуемый период (1979–2016 гг.), что соответствует потеплению климата (IPCC..., 2013) и свидетельствует о снижении количества XB над $ЯМ$. Тенденция к сокращению количества вторжений над южной частью моря прогнозируется и в работе (Kolstad, Bracegirdle, 2008) для второй половины XXI столетия по результатам численных экспериментов с климатическими проекциями.



*Рис. 5. Диаграмма межгодовой изменчивости аномалии температуры воздуха у поверхности (T_a , °C) в зоне высокой корреляции (на *рис. 4а* эта область выделена прямоугольником) для 37 холодных сезонов с 1979/1980 по 2015/2016 гг. Аномалии вычислены как отклонения от T_a , осредненной за все холодные сезоны 1979–2016 гг. Черная кривая – 5-летнее скользящее среднее*

Заключение

Выполнен комплексный анализ межгодовой изменчивости характеристик *XВ* над *ЯМ* на основе данных спутникового дистанционного зондирования и реанализа высокого разрешения *NCEP-CFSR*. Предложены критерии регистрации *XВ* в векторных полях приводного ветра и по спутниковым видимым/*ИК* изображениям облачности. За 16 холодных сезонов (ноябрь–март) 2000–2016 гг. было зарегистрировано 403 *XВ*, как правило, наблюдавшихся в тылу внетропических циклонов синоптического масштаба. Установлено, что в 36% случаев продолжительность вторжений не достигала 1 сут. Значительная их часть в стадии максимального развития сопровождалась штормовым ветром (≥ 20 м/с), обуславливающим интенсивный турбулентный энерго- и массоперенос через морскую поверхность.

Выявлена статистическая взаимосвязь между повторяемостью *XВ*, межгодовыми колебаниями температуры воздуха у поверхности (T_a) и суммарного (явный + скрытый) турбулентного потока тепла с поверхности *ЯМ* в атмосферу (Q_{S+LE}). Наиболее тесная обратная корреляция T_a и количества вторжений (R меньше $-0,80$) отмечается над континентальной частью Дальнего Востока с координатами центра $47,5^\circ$ с.ш., $135,5^\circ$ в.д. (на *рис. 4а* эта область выделена прямоугольником). Временной ряд T_a за исследуемый период (1979–2016 гг.) в выделенной области содержит колебание с периодом, близким к десятилетнему, наиболее выраженное с 2006 г. по 2016 г. Это позволяет выдвинуть гипотезу о кваздекадной цикличности активности *XВ* над *ЯМ*. Также отмечена тенденция к уменьшению амплитуды и продолжительности стадии отрицательной аномалии T_a , что соответствует потеплению климата и свидетельствует о снижении количества *XВ*.

Авторы благодарят С.Ю. Глебову, Е.И. Устинову, В.И. Пономарева за полезные обсуждения межгодовой изменчивости погодных явлений над *ЯМ*. А также выражают признательность Bob Dattore (сервис Research Data Archive – реанализ *NCEP/CFSR*) и И.Д. Ростову (портал ЕСИМО) за оперативную техническую поддержку. Крайне ценным было обсуждение работы с Л.М. Митником, О.О. Трусенковой, И.А. Гурвич, В.В. Навроцким и полезные замечания коллег.

Сбор и обработка спутниковых измерений и данных реанализа частично поддержаны грантами ДВО РАН 15-I-1-009_о и РФФИ 14-05-00959-а. Анализ долгопериодной изменчивости характеристик холодных вторжений над Японским морем выполнен в рамках целевой комплексной программы ДВО РАН «Спутниковый мониторинг Дальнего Востока для проведения фундаментальных научных исследований ДВО РАН».

Литература

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.
2. Пичугин М.К., Пономарев В.И. Изменчивость потоков явного и скрытого тепла в северо-западной части Японского моря в холодный период года // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 22–29.

3. Похил А.Э. Об идентификации зон штормового волнения и штиля в Тихом океане по спутниковым снимкам облачности // Метеорология и гидрология. 1985. № 12. С. 68–76.
4. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Ред. Л.М. Митник, С.В. Викторова. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.
5. 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.
6. Compo G., Kiladis G.N., Webster P.J. The horizontal and vertical structure of east Asian winter monsoon pressure surges // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1999. Vol. 125. No. 553. P. 29–54.
7. Cui Y., Senju T. Interdecadal oscillations in the Japan Sea proper water related to the arctic oscillation // *Journal of Oceanography*. 2010. Vol. 66. No. 3. 337 p.
8. Dorman C.E., Beardsley R.C., Dashko N.A., Friehe C.A., Kheif D., Cho K., Limeburner R., Varlamov S.M. Winter marine atmospheric conditions over the Japan Sea // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. No. C12. C12011 p.
9. IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, 2013. 1552 p.
10. Isobe A., Beardsley R.C. Atmosphere and Marginal-Sea Interaction Leading to an Interannual Variation in Cold-Air Outbreak Activity over the Japan Sea // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20. № 23. P. 5707.
11. Gong D.-Y., Wang S.-W., Zhu J.-H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. No. 10. P. 2073–2076.
12. Jensen T.G., Campbell T.J., Allard R.A., Small R.J., Smith T.A. Turbulent heat fluxes during an intense cold-air outbreak over the Kuroshio Extension Region: Results from a high-resolution coupled atmosphere-ocean model // *Ocean Dynamics*. 2011. Vol. 61. P. 657–674.
13. Jhun J.-G., Lee E.-J. A new east Asian Winter Monsoon Index and associated characteristics of the winter monsoon // *J. Clim.* 2004. Vol. 17. No. 4. P. 711–726.
14. Kawamura H., Wu P. Formation mechanism of Japan Sea Proper Water in the flux center off Vladivostok // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. No. C10. P. 21611–21622.
15. 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. No. 7. P. 871–885.
16. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Microwave characteristics of organized mesoscale convection over the ocean // Proc. 10th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. Microrad08. Florence, Italy, 11–14 March 2008. IEEE Catalog Number CFP0892D (softbound) CFP0892D-CDR (CD ROM).
17. 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.
18. Mourad P.D., Walter B.A. Viewing a cold air outbreak using satellite-based synthetic aperture radar and advanced very high resolution radiometer imagery // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 16391–16400.
19. Nagata M., Ikawa M., Yoshizumi S., Yoshida T. On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter: Numerical experiments // *J. Meteor. Soc. Jpn.* 1986. Vol. 64. P. 841–855.
20. Onitsuka G., Yanagi T., Yoon J.-H. A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. No. C05. P. C05042.
21. Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.-Y., Kim K.-R. Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea // *Deep-sea Research Part I*. 2007. Vol. 54. P. 453–470.
22. Park T.-W., Ho C.-H., Yang S. Relationship between the Arctic oscillation and the cold surges over East Asia // *J. Clim.* 2011. Vol. 24. No. 1. P. 68–83.
23. Saha S., Moorthi S., Pan H.L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.T., Chuang H.Y., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Dool H.V.D., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, Bull // *Am. Meteorol. Soc.* 2010. Vol. 91. No. 8. P. 1015–1057.
24. Seung Y.H., Yoon J.H. Some features of winter convection in the Japan Sea // *J. Oceanogr.* 1995. Vol. 5. No. 1. P. 61–73.
25. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A., Tishchenko P., Zhabin I., Riser S. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. P. 8.1–8.4.
26. Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. No. 9. P. 1297–1300.
27. Woo S.-H., Kim B.-M., Jeong J.-H., Kim S.-J., Lim G.-H. Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979–2011) // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. No. D18. P. D18117.
28. Wu B., Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon // *Geophys. Res. Lett.* 2002 Vol. 29. No. 19. P. 1897.
29. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES) // *Prog. Oceanogr.* 2004. Vol. 61. No. 2–4. P. 193–211.
30. Yanase W., Niino H., Watanabe S.I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gurvich I.A. Climatology of Polar Lows over the Sea of Japan Using the JRA-55 Reanalysis // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. No. 2. P. 00419–00437.

Interannual variability in cold-air outbreak characteristics over the Sea of Japan

M.K. Pichugin¹, D.G. Chechin²

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

E-mail: pichugin.mk@gmail.com

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*

E-mail: chechin@ifaran.ru

Interannual variability of the cold-air outbreak (CAO) activity over the Sea of Japan (JS) is analyzed using satellite remote sensing and NCEP-CFSR high-resolution reanalysis data set for the period of 1979–2016. The criteria for quantitative definition of CAO are proposed. They are based on satellite microwave passive and active measurements of near sea surface vector wind and visible/infrared images of clouds for 16 cold seasons (Nov.–Mar.) in 2000–2016. Analysis of CAO characteristics reveals that duration (D) of 36% of the events is less than a 24-hour period ($D < 1$ day). A significant part of them is accompanied by a storm wind (≥ 20 m/s) at the stage of maximum development enhancing turbulent air-sea fluxes. A statistically significant correlations between interannual variations of the number of CAO events and of the ocean-atmosphere system parameters (near surface air temperature (T_a) and the total (latent + sensible) turbulent air-sea heat flux) were found. Over the continental part of the Far East, the T_a was found to have a strong inverse correlation of -0.86 with the number of CAOs in the area with the center coordinates 47.5°N, 135.5°E. Since T_a in the area varies with period near to 10 years, we hypothesize that CAO activity fluctuation over the Sea of Japan is close to decadal.

Keywords: cold-air outbreak, Sea of Japan, remote sensing, decadal variability, indication, interannual variability, air temperature, heat flux

Accepted: 22.09.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-238-248

References

1. Pichugin M.K., Mitnik L.M., Kholodnye vtorzheniya nad Beringovym morem: analiz po dannym sputnikovykh mikrovolnovykh i opticheskikh izmereniy, radiozondirovaniya atmosfery i okeanicheskikh buev (Cold-air outbreaks over the Bering Sea: Satellite multisensor analysis), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 172–179.
2. Pichugin M.K., Ponomarev V.I., Izmenchivost' potokov yavnogo i skrytogo tepla v severo-zapadnoy chasti Yaponskogo morya v kholodnyy period goda (Variability of sensible and latent heat fluxes over the northwest part of the Sea of Japan in cold season), *Vestnik DVO RAN*, 2013, No. 6, pp. 22–29.
3. Pokhil A.E., Ob identifikatsii zon shtormovogo volneniya i shtilya v Tikhom okeane po sputnikovym snimkam oblachnosti (On the identification of areas of storm waves and calm in the Pacific Ocean by satellite images of clouds), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1985, No. 12, pp. 68–76.
4. Mitnik L.M., Viktorova S.V., Radiolokatsiya poverkhnosti Zemli iz Kosmosa (The radar sensing of the Earth from space), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1990, 200 p.
5. 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, pp. 1034–1050.
6. Compo G., Kiladis G.N., Webster P.J., The horizontal and vertical structure of East Asian winter monsoon pressure surges, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1999, Vol. 125, No. 553, pp. 29–54.
7. Cui Y., Senjyu T., Interdecadal oscillations in the Japan Sea proper water related to the arctic oscillation, *Journal of Oceanography*, 2010, Vol. 66, No. 3, pp. 337.
8. Dorman C.E., Beardsley R.C., Dashko N.A., Friehe C.A., Kheif D., Cho K., Limeburner R., Varlamov S.M., Winter marine atmospheric conditions over the Japan Sea, *J. Geophys. Res.*, 2004, Vol. 109, No. C12, p. C12011.
9. IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, 2013, 1552 p.
10. Isobe A., Beardsley R.C., Atmosphere and Marginal-Sea Interaction Leading to an Interannual Variation in Cold-Air Outbreak Activity over the Japan Sea, *Journal of Climate*, 2007, Vol. 20, No. 23, p. 5707.
11. Gong D.-Y., Wang S.-W., Zhu J.-H., East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 2001, Vol. 28, No. 10, pp. 2073–2076.
12. Jensen T.G., Campbell T.J., Allard R.A., Small R.J., Smith T.A., Turbulent heat fluxes during an intense cold-air outbreak over the Kuroshio Extension Region: Results from a high-resolution coupled atmosphere-ocean model, *Ocean Dynamics*, 2011, Vol. 61, pp. 657–674.
13. Jhun J.-G., Lee E.-J., A new east Asian Winter Monsoon Index and associated characteristics of the winter monsoon, *J. Clim.*, 2004, Vol. 17, No. 4, pp. 711–726.
14. Kawamura H., Wu P., Formation mechanism of Japan Sea Proper Water in the flux center off Vladivostok, *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, No. C10, pp. 21611–21622.

15. 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, No. 7, pp. 871–885.
16. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Microwave characteristics of organized mesoscale convection over the ocean, *Proc. 10th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*, Microrad08, Florence, Italy, 11–14 March 2008, IEEE Catalog Number CFP0892D (softbound) CFP0892D-CDR (CD ROM).
17. 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, pp. 2345–2348.
18. Mourad P.D., Walter B.A., Viewing a cold air outbreak using satellite-based synthetic aperture radar and advanced very high resolution radiometer imagery, *J. Geophys. Res.*, 1996, Vol. 101, pp. 16391–16400.
19. Nagata M., Ikawa M., Yoshizumi S., Yoshida T., On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter: Numerical experiments, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 1986, Vol. 64, pp. 841–855.
20. Onitsuka G., Yanagi T., Yoon J.-H., A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, No. C05, p. C05042.
21. Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.-Y., Kim K.-R., Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea, *Deep-sea Research Part I*, 2007, Vol. 54, pp. 453–470.
22. Park T.-W., Ho C.-H., Yang S., Relationship between the Arctic oscillation and the cold surges over East Asia, *J. Clim.*, 2011, Vol. 24, No. 1, pp. 68–83.
23. Saha S. Moorthi S., Pan H.L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.T., Chuang H.Y., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Dool H.V.D., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2010, V. 91, No. 8, pp. 1015–1057.
24. Seung Y.H., Yoon J.H., Some features of winter convection in the Japan Sea, *J. Oceanogr.*, 1995, Vol. 5, No. 1, pp. 61–73.
25. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A., Tishchenko P., Zhabin I., Riser S., Deep convection and brine rejection in the Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 2003, Vol. 30, pp. 8.1–8.4.
26. Thompson D.W.J., Wallace J.M., The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, Vol. 25, No. 9, pp. 1297–1300.
27. Woo S.-H., Kim B.-M., Jeong J.-H., Kim S.-J., Lim G.-H., Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979–2011), *J. Geophys. Res.*, 2012, Vol. 117, No. D18, p. D18117.
28. Wu B., Wang J., Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, Vol. 29, No. 19, p. 1897.
29. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S., Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES), *Prog. Oceanogr.*, 2004, Vol. 61, No. 2–4, pp. 193–211.
30. Yanase W., Niino H., Watanabe S.I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gurvich I.A., Climatology of Polar Lows over the Sea of Japan Using the JRA-55 Reanalysis, *Journal of Climate*, 2016, Vol. 29, No. 2, pp. 00419–00437.