Анализ экстремального ветра в интенсивных внетропических циклонах над северной частью Тихого океана на основе измерений со спутника SMAP

М.К. Пичугин, И.А. Гурвич, А.В. Баранюк

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mails: pichugin@poi.dvo.ru, gurvich@poi.dvo.ru, vykochko@poi.dvo.ru

В холодное полугодие внетропические циклоны (ВТЦ) часто связаны с опасными погодными явлениями, особенно с ураганным ветром, высоким волнением и экстремальными осадками. Вместе с тем изучению долгосрочных изменений характеристик циклонов препятствуют пробелы в инструментах наблюдений и неопределённости в оценках циклонической активности как прогностическими моделями, так и реанализом. В настоящей работе исследованы ветровые условия в интенсивных внетропических циклонах над северной частью Тихого океана. Исследование основано на измерениях со спутника SMAP, а также данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ERA5 и оперативного анализа национального центра прогнозирования состояния окружающей среды США NCEP-CFSv2. Микроволновый радиометр на спутнике SMAP позволяет восстанавливать ветер у морской поверхности со скоростью до 70 м/с, в том числе в зонах сильных осадков из-за крайне слабого рассеяния и ослабления электромагнитных волн отдельными гидрометеорами. Период исследования ограничен временем запуска спутника и составляет шесть холодных сезонов (ноябрь-март) с 2015 по 2021 г. В результате было выявлено 105 случаев внетропических циклонов с ураганным (>33 м/с) ветром, попадающих в полосу обзора радиометра. Большинство из них (около 60 %) регистрировалось в декабре и январе южнее Алеутских о-вов и п-ова Камчатки. Более 40 % ВТЦ демонстрировали «взрывной» характер развития и наблюдались преимущественно в районе продолжения течения Куросио. В отдельных случаях спутниковые оценки скорости ветра достилали 55-60 м/с. Анализ распределения максимальной скорости ветра по данным SMAP чётко выделяет отдельную группу наиболее интенсивных циклонов с особым механизмом формирования экстремального ветра. Мы предполагаем, что эти ВТЦ развивались по типу модели Шапиро-Кейзера с образованием мезомасштабной области экстремального ветра, также называемой sting jet. Сравнительный анализ распределения ветра в циклоне по данным SMAP и реанализов выявил значительную недооценку последними в области высоких скоростей более 25 м/с. Наибольшие расхождения со спутниковыми оценками скорости ветра показал реанализ ERA5 независимо от месяца или географического района.

Ключевые слова: спутниковое микроволновое зондирование, внетропические циклоны, северная часть Тихого океана, микроволновый радиометр SMAP, приводный ветер

Одобрена к печати: 27.09.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-287-299

Введение

Внетропические циклоны (ВТЦ) представляются ключевым фактором ежедневной изменчивости погоды в средних и высоких широтах и часто связаны со значительным воздействием экстремального ветра (Browning, 2004), штормового волнения и интенсивных осадков (Hawcroft et al., 2012) как в открытом океане, так и в прибрежных районах. Такие события могут иметь существенные социально-экономические последствия для судоходства, объектов морской инфраструктуры и территорий, подверженных наводнениям. Показательной в этом отношении становится скорость ветра. Например, в исследовании (Kezunovic et al., 2008) показано, что увеличение пикового порыва на четверть приводит к семикратному увеличению повреждений зданий.

С усовершенствованием прогностических моделей заметно растёт вклад исследований ВТЦ в решении как научных, так и прикладных задач. Одним из относительно надёжных результатов становится прогнозирование общего снижения активности ВТЦ на протяжении XXI в. вместе со слабым смещением к полюсу их траекторий (Bengtsson et al., 2006; Chang et al., 2012; Sinclair et al., 2020). Однако в зависимости от сезона и выбранного региона тенденции в изменении их частоты и интенсивности могут различаться не только по величине, но и по знаку. Заметные противоречия наблюдаются также в оценках интенсификации экстремальных случаев ВТЦ, при этом одни исследования прогнозируют рост их количества (Mizuta et al., 2011; Pfahl et al., 2015), другие — небольшое снижение (Michaelis et al., 2017; Zappa et al., 2013).

В холодное полугодие ВТЦ оказывают существенное влияние на ветровые условия в северной части Тихого океана. Одни из них формируются над континентом и начинают интенсивно углубляться при выходе на морскую поверхность, другие зарождаются на волнах полярного фронта и быстро углубляются над течением Куросио, перемещаясь, как правило, на северо-восток. Часть циклонов классифицируются как «взрывные» из-за резкого падения давления в центре. Развитие таких циклонов наблюдается преимущественно в зимние месяцы и часто сопровождается ураганным ветром (Iwao et al., 2012).

Изучению разномасштабных изменений характеристик интенсивных циклонов препятствуют пробелы в инструментах наблюдений и неопределённости в оценках циклонической активности на основе как прогностических моделей, так и данных реанализа. Важный источник данных о характеристиках атмосферы при прогнозе траектории и эволюции ВТЦ спутниковые измерения. Комплексное использование спутниковых микроволновых данных, получаемых активными (скаттерометры) и пассивными (микроволновые радиометры) сенсорами, позволяет получать сведения об интегральном содержании водяного пара в атмосфере и водозапаса облаков, интенсивности осадков, распределении скорости ветра, а также уточнять положение, интенсивность и стадию развития погодных систем.

В настоящей работе исследуются ветровые условия в интенсивных ВТЦ с ураганным ветром над северной частью Тихого океана на основе измерений со спутника SMAP (*англ*. Soil Moisture Active Passive), позволяющих восстанавливать скорость ветра у морской поверхности до 70 м/с. Дополнительно рассмотрены возможности современных реанализов объективно воспроизводить экстремальный ветер, в том числе связанный со «взрывным» циклогенезом.

Данные и методы

Спутник SMAP

Анализ распределения скорости приводного ветра в интенсивных ВТЦ выполнен на основе измерений, полученных со спутника SMAP. SMAP, запущенный в январе 2015 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой 685 км, имеет на борту микроволновый радиометр, работающий на частоте v = 1,41 ГГц. Пространственное разрешение составляет около 40 км, ширина полосы обзора — 1000 км. Глобальные поля скорости ветра у морской поверхности, восстановленные по яркостным температурам из измерений радиометра, взяты из архива Remote Sensing System в узлах регулярной сетки $0,25 \times 0,25^{\circ}$ (ftp://ftp.remss.com/smap/wind/). Радиометр SMAP позволяет восстанавливать ветер у морской поверхности со скоростью до 70 м/с, в том числе в зонах сильных осадков из-за крайне слабого рассеяния и ослабления электромагнитных волн отдельными гидрометеорами (Meissner et al., 2017). Выбранная нами версия алгоритма (V1.0) учитывает небольшую зависимость яркостной температуры от температуры поверхности океана (ТПО), которая при значительных вариациях ТПО становится заметной. Период исследования ограничен временем запуска спутника и составляет шесть холодных сезонов (ноябрь – март) с 2015 по 2021 г.

Сопутствующие спутниковые измерения

Структура облачности взрывных циклонов идентифицировалась по изображениям в видимом или инфракрасном диапазоне длин волн, полученным спектрорадиометром MODIS (*англ*.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Aqua и Terra, радиометром VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) со спутников NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership) и NOAA-20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований) и многоканальным радиометром AHI (*англ.* Advanced Himawari Imager) со спутника Himawari-8 с пространственным разрешением 2 км.

Количественные характеристики, такие как паросодержание атмосферы V, содержание капельной влаги в облаках Q и скорость ветра W, восстанавливались алгоритмами (Zabolotskikh et al., 2015) по яркостной температуре T_g , полученной микроволновым радиометром AMSR2 (*англ*. Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) со спутника GCOM-W1 (*англ*. Global Change Observation Mission). AMSR2 принимает излучение Земли на частотах от 6,9 до 89,0 ГГц на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях. Пространственное разрешение составляет 35×62 км на частоте v = 6,9 ГГц и 3×5 км на v = 89,0 ГГц. Расчёт атмосферных характеристик выполнен с использованием T_g (v = 10,65; 24; 36 ГГц) уровня 1R, взятых с ресурса Японского агентства аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA) (https://gportal.jaxa.jp/gpr/?lang=en).

Данные реанализов ERA5 и CFSv2

Ежечасные поля составляющих скорости ветра, температуры воздуха и атмосферного давления, приведённого к уровню моря, взяты из реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (*англ*. European Centre for Medium-Range Wether Forecasts — ECMWF) (Hersbach et al., 2020) и оперативного анализа CFSv2 Национального центра прогнозирования состояния окружающей среды США (*англ*. National Centers for Environmental Prediction — NCEP) (Saha et al., 2014). Пространственное разрешение моделей в обоих реанализах сопоставимо, но поля давления из CFSv2 имеют более грубую сетку $0,5 \times 0,5^{\circ}$ (*maблица*). Также в ERA5 тропосфера представлена на 27 изобарических уровнях от поверхности до 100 гПа.

	ERA-5 (ECMWF)	CFSV2 (NCEP)
Период	с 1979 г. по наст. вр.	с 2011 г. по наст. вр.
Временное разрешение	1 ч	
Разрешение модели	Т639, 31 км	27 км
Горизонтальное разрешение	0,25×0,25°	0,2×0,2°, 0,5×0,5°
Вертикальное разрешение	137 уровней (0,01 гПа)	37 уровней (1 гПа)
Ассимиляция данных	4D-Var	3D-Var

Основные характеристики реанализов

Идентификация интенсивных внетропических циклонов и анализ их эволюции

В настоящем исследовании ВТЦ считается интенсивным и включается в анализ при следующих условиях: его центр зарегистрирован над северной частью Тихого океана (30–65° с.ш., 130° в.д. – 120° з.д.); скорость ветра в циклоне (по данным SMAP) ≥33 м/с; выделенная зона ураганного ветра содержит не менее четырёх точек в узлах регулярной сетки 0,25×0,25°. Важно отметить, что обнаруженные зоны ураганного ветра были связаны только с циклогенезом (в холодные сезоны 2015–2021 гг. других причин не наблюдалось). Исключением стала область у юго-восточного побережья Камчатского п-ова в марте 2017 г., где SMAP ошибочно регистрировал ураганный ветер вблизи дрейфующего льда из-за некорректного маскирования. Массив идентифицированных интенсивных циклонов дополнялся значениями атмосферного давления в центре и географическими координатами его положения по данным реанализов в период ± 24 ч относительно времени измерений SMAP. Это позволило рассмотреть эволюцию барической системы и выделить случаи взрывного циклогенеза, при котором, согласно модифицированному критерию (Zhang et al., 2017), выполняется следующее условие:

$$\frac{P_{c}(t_{i}-6)-P_{c}}{12} \cdot \frac{\sin 45^{\circ}}{\sin \frac{\phi_{c}(t_{i}-6)+\phi_{c}(t_{i}+6)}{2}} \ge 1,$$
(1)

где t_i — время в часах; P_c и ϕ_c — атмосферное давление в центре циклона и широта его положения в моменты времени (t_i – 6) и (t_i + 6). Фактически выражение (1) оценивает скорость углубления циклона (гПа/ч) за 12 ч с учётом среднего положения центра относительно 45° с. ш.

На *рис. 1* приведён пример интенсивного ВТЦ в северо-западной части Тихого океана (C3TO), который был зарегистрирован в поле скорости ветра, восстановленной из измерений радиометра SMAP 18 января 2019 г.



Рис. 1. Пример интенсивного внетропического циклона (выделен красным эллипсом), зарегистрированного 18 января 2019 г. в поле скорости ветра у морской поверхности (цветовая шкала в метрах в секунду) по данным микроволнового радиометра SMAP. Синими контурами выделены изотахи 25 и 33 м/с

Дополнительно для сравнительного анализа циклонической активности использовался архив данных по ВТЦ с ураганным ветром, составленный Центром океанических прогнозов ОРС (*англ*. Ocean Prediction Center) NOAA (https://ocean.weather.gov/climo/storm_track.php).

Характеристики внетропических циклонов с ураганным ветром

За шесть холодных сезонов (2015–2021) было выявлено 105 случаев ВТЦ с ураганным (≥33 м/с) ветром, попадающих в полосу обзора радиометра SMAP. На *рис. 2* (см. с. 291) представлена карта пространственного распределения центров зарегистрированных ВТЦ, совмещённая с повторяемостью интенсивных циклонов, взятых из архива центра океанических прогнозов NOAA за тот же период. Хотя последний содержит кратно большее количество случаев с ураганным ветром, зоны повышенной циклонической активности хорошо согласуются с данными SMAP.



Рис. 2. Карта повторяемости внетропических циклонов с ураганным ветром (цветовая шкала) на единицу площади 10⁶ км² (соответствующей сферическому сегменту ~5°) за шесть холодных сезонов 2015– 2021 гг.; синими точками отмечены положения центров интенсивных циклонов, зарегистрированных по данным микроволнового радиометра SMAP. Карта повторяемости составлена на основе архива Центра океанических прогнозов NOAA

Значительная часть циклонов (около 43 %) сконцентрирована к юго-востоку от п-ова Камчатка — типичной области зимнего циклогенеза в СЗТО (Тунеголовец, 2007; Gyakum et al., 1989). Здесь повторяемость циклонов с ураганным ветром максимальна. Большинство из них регистрировалось в декабре – январе, во время действия зимнего муссона. Существенным фактором циклогенеза в этот период становится адвекция сухой холодной воздушной массы с азиатского континента, которая в ряде случаев вызывает продолжительные холодные вторжения на акватории Японского и Охотского морей и прилегающей части открытого океана. Более 40 % циклонов демонстрировали «взрывной» характер и наблюдались преимущественно в области продолжения течения Куросио — типичном для северной части Тихого океана районе взрывного циклогенеза (Iwao et al., 2012; Zhang et al., 2017).

Вторая область с относительно высокой повторяемостью интенсивных циклонов расположена южнее Аляски между 40 и 47° с. ш. По данным SMAP, область активного циклогенеза вытянута зонально вдоль субполярного океанического фронта и локализована в том же широтном поясе. Здесь возможным механизмом интенсификации циклонов может служить бароклинная неустойчивость из-за региональной особенности распределения ТПО, что приводит к росту циклонической потенциальной завихренности в нижней тропосфере (Pickart et al., 2009). Этот локальный очаг циклонической активности имеет сезонный сдвиг на восток по мере охлаждения океана и проявляет себя в распределении ВТЦ с ураганным ветром (см. *рис. 2*).

Распределение максимальной скорости ветра у морской поверхности

Рисунок За показывает распределения максимальной скорости ветра (W_{max} , м/с) для всех 105 интенсивных ВТЦ, полученные из ERA5 и CFSv2. Оба реанализа заметно занижают оценки экстремального ветра в сравнении с измерениями SMAP. Если по данным CFSv2 ураганный ветер регистрируется лишь в 40 % случаев, то ERA5 идентифицирует только три циклона с $W_{max} < 38$ м/с. Более того, наблюдается расхождение в оценках W_{max} между реанализами. Так, CFSv2 воспроизводит более интенсивные циклоны, что не противоречит аналогичным оценкам, выполненным для Атлантического океана (Gramcianinov et al., 2020).



Рис. 3. Распределение максимальной скорости ветра (W_{max} , м/с) в зарегистрированных интенсивных внетропических циклонах на диаграмме рассеяния по данным CFSv2 и ERA5 (*a*), на гистограмме по данным SMAP (*б*). Красные пунктирные линии определяют области ураганного ветра ($W_{max} \ge 33$ м/с)

В распределении максимальной скорости ветра по данным SMAP выделяются две группы циклонов (*puc. 36*): в первую входит подавляющее большинство случаев с типичными значениями $W_{\rm max} = 35-37$ м/с; вторую группу составляет лишь 14 % наиболее интенсивных циклонов со скоростью $W_{\rm max} > 43$ м/с (в отдельных случаях до 55–60 м/с). Важно отметить, что в распределении максимальной скорости, полученной на основе реанализов (не показано), вторая группа не выделяется. Такое распределение допускает наличие отдельного класса наиболее интенсивных ВТЦ с особым механизмом формирования экстремального ветра.

Мы предполагаем, что циклоны из второй группы развивались по типу концептуальной модели Шапиро – Кейзера — быстрого циклогенеза без смыкания холодного фронта с тёплым (Shapiro, Keyser, 1990). Для таких циклонов характерно образование тёплого ядра и мезомасштабной области экстремального ветра (как правило, более 44—45 м/с) с горизонтальным размером менее 100 км (Browning, 2004; Burt, Mansfield, 1988; Schultz, Browning, 2017), называемой в зарубежной литературе sting jet — «жалящая струя» (далее в статье — SJ). Дискуссия относительно физических механизмов возникновения SJ всё ещё актуальна, а реалистичное воспроизведение такой мезомасштабной особенности требует усовершенствования оперативных прогностических моделей, что повышает ценность настоящего исследования.

Взрывной циклогенез с экстремальным ветром

В этом разделе представлен анализ взрывного ВТЦ над СЗТО со скоростью ветра ~60 м/с, максимальной не только для 105 зарегистрированных нами случаев, но и для опубликованных ранее (Clark, Gray, 2018). Циклон развивался по модели Шапиро – Кейзера, на что указывают такие характерные особенности, как формирование тёплого ядра и мезомасштабной области с ураганным ветром (Clark, Gray, 2018; Shapiro, Keyzer, 1990).

Синоптические условия

Блокирующий процесс при локализации тихоокеанского высотного гребня над Беринговым морем вызвал стационирование высотной депрессии над Охотским морем, что активизировало циклоническую деятельность (*рис. 4a*, *б*, см. с. 293). Циклон, который представля-

ет собой объект исследования, возник в 18:00 GMT (*англ.* Greenwich Mean Time) 27 декабря в многоцентровой циклонической системе под высотной депрессией, быстро перемещался на северо-восток с относительно тёплой морской поверхности на более холодную и интенсивно углублялся. За сутки он углубился на 34 гПа (от 994 до 962 гПа), максимальное падение давления в его центре (14 гПа/6 ч) наблюдалось между 06:00 и 12:00 GMT 28 декабря (*рис. 4г*). Таким образом, циклон был классифицирован как «взрывной». Около двух суток он был низким барическим образованием. К 12:00 GMT 29 декабря циклоническая циркуляция распространилась до высоты изобарической поверхности 500 гПа, в результате чего приземный центр циклона сделал петлю (см. *рис. 4г*). Тогда же было зарегистрировано минимальное давление в его центре — 944 гПа. По мере разрушения блокирующего высотного гребня циклон перемещался на восток-северо-восток и заполнялся.





Рис. 4. Карты ЯМА приземного анализа в 18:00 GMT (*a*) и AT500 в 12:00 GMT (*б*) 27 декабря 2018 г.; ИК-изображение (инфракрасное), полученное радиометром АНІ на спутнике Himawari-8 в 19:00 GMT 28 декабря 2018 г. (*в*); траектория циклона по данным ЯМА за период от 18:00 GMT 27 декабря 2018 г. по 12:00 GMT 1 января 2019 г. (*г*). Врезка на *рис. 4г* — график падения давления в центре циклона





г

Рис. 5. Поле скорости приводного ветра по данным SMAP и атмосферного давления на уровне моря из реанализа ERA5 (*a*); профиль скорости ветра (линия AB на *puc. 5a*) вдоль меридиана 173,5° в.д. (*б*); разрез полей вертикальной компоненты скорости ветра (Па/с, синий и красный пунктир) и температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях (в градациях серого) вдоль меридиана 172,4° в.д. (через центр циклона по данным ERA5) (*в*); фрагмент центральной части циклона на ИК-изображении AHI (спутник Himawari-8) в 22:00 GMT 28 декабря 2018 г. (*г*). Шкала на *рис. 5в* — температура воздуха в Кельвинах

Анализ термобарического поля тропосферы показал процесс секклюзии, т.е. отсечения и изоляции участка тёплого сектора циклона, и, как следствие, образование тёплого ядра (Зверев, 1977; Shapiro, Keyzer, 1990). Карты абсолютной топографии AT500 и AT850 Японского метеорологического агентства (ЯМА, *англ*. Japan Meteorological Agency) в 12:00 GMT 28 декабря и в 00:00 GMT 29 декабря (не представлены) показывают, что язык холода располагался широтно, а меридионально направленный гребень тепла примерно на 50-й параллели отклонялся на запад и огибал северную периферию высотной депрессии. Таким образом, окклюдирование циклона начиналось на удалении от его центра, а участок тёплого сектора изолировался.

Область sting jet

Экстремальный ветер (~60 м/с) был зарегистрирован спутником SMAP в 19:00 GMT 28 декабря в южном секторе циклона (*puc. 4в*, *5a*, см. с. 294) при давлении в его центре 962 гПа (в 18:00 GMT по данным ЯМА). В поле давления, взятом из реанализа ERA5, положение центра циклона смещено примерно на 100 км к юго-западу относительно спутниковых оценок. Разрез через поле скорости спутникового ветра вдоль меридиана 173,5° в.д. пересекает область экстремальной скорости шириной примерно 80 км, расположенную южнее центра и ориентированную вдоль траектории циклона. На меридиональном профиле (*puc. 56*) виден резкий рост скорости ветра в границах области.

Инфракрасные изображения центральной части циклона, так называемой «облачной головы», со спутника Himawari-8 от 15:00 GMT 28 декабря по 12:00 GMT 29 декабря демонстрируют развитие облачных полос с полупрозрачными или тёмными полосами между ними. Эти полосы авторы публикации (Clark, Gray, 2018) интерпретируют как свидетельство наклонных нисходящих движений воздуха из верхней части облачной системы циклона в область фронтального раздела и связывают этот процесс с резким усилением приводного ветра. На ИК-изображении АНІ (спутник Himawari-8) в 22:00 GMT 28 декабря (*puc. 5г*) структура облачных полос и тёмных просветов между ними видна более отчётливо, чем в 19:00 GMT. Не исключено, что ветер продолжал усиливаться и после 19:00 GMT, однако отсутствие данных SMAP не позволяет делать достоверных выводов о времени его максимальной скорости.

Ещё одна характерная особенность взрывных циклонов с экстремальными ветрами — так называемая «сухая щель»: узкая полоса сухого воздуха, проникающего в центр циклона и связанного с «сухим» вторжением из стратосферы или верхних слоёв тропосферы (Clark, Gray, 2018); хорошо видна на ИК-изображениях АНІ (см. *рис. 4a, 5г*), где, по данным радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1), интегральное содержание водяного пара в атмосфере не превышает 4-5 кг/м². Разрез полей температуры и вертикальной компоненты скорости движения воздуха по долготе $172,4^{\circ}$ в.д. (через центр циклона по данным ERA5) показывает нисходящие движения воздуха (синий пунктир) к югу от центра и восходящие (красный пунктир) — к северу (*рис. 5в*). Вертикальные движения охватывают слой тропосферы между изобарическими поверхностями 950–400 гПа. Очаг максимальной скорости нисходящих движений w = 4 Па/с определяется на высоте примерно 2–3 км, между изобарическими поверхностями 270–280 К в слое между изобарическими поверхностями 1000–800 гПа (см. *рис. 5в*).

Совокупность перечисленных выше специфических характеристик развития циклона указывает на мезомасштабный процесс sting jet («жалящей струи») — наиболее опасной и разрушительной особенности взрывного циклогенеза (Browning, 2004; Clark, Gray, 2018; Shapiro, Keyser, 1990).

Заключение

В настоящей работе идентифицированы и исследованы экстремальные внетропические циклоны с ураганным ветром (≥33 м/с) в северной части Тихого океана. Оценки приводного ветра выполнены для шести холодных сезонов 2015–2021 гг. на основе измерений со спутника SMAP, позволяющих восстанавливать его скорость от 10 до 70 м/с. Дополнительно рассмотрены возможности реанализа ECMWF ERA5 и оперативного анализа NCEP CFSv2 с сопоставимым пространственным разрешением объективно воспроизводить ветровые условия в интенсивных ВТЦ.

За исследуемый период в полосу обзора радиометра на спутнике SMAP попало 105 случаев ВТЦ с ураганным ветром. Значительная часть циклонов (около 43 %) сконцентрирована к юго-востоку от п-ова Камчатки — типичной области зимнего циклогенеза в СЗТО, где регулярно наблюдаются холодные вторжения с азиатского континента. Вторая область интенсивного циклогенеза расположена южнее Аляски и вытянута зонально вдоль субполярного океанического фронта между 40 и 47° с. ш. Здесь к интенсификации циклонов может приводить осенне-зимний рост циклонической потенциальной завихренности в нижней тропосфере из-за региональной особенности распределения ТПО. Этот очаг циклонической активности имеет сезонный сдвиг на восток по мере охлаждения океана и влияет на распределение ВТЦ с ураганным ветром.

Анализ распределения максимальной скорости ветра в ВТЦ по данным ERA5 и CFSv2 показал, что оба реанализа заметно занижают оценки экстремального ветра в сравнении с измерениями SMAP. Если по данным CFSv2 ураганный ветер регистрируется лишь в 40 % случаев, то ERA5 идентифицирует только три циклона с $W_{\rm max} < 38$ м/с. Важно отметить, что CFSv2 воспроизводит более интенсивные циклоны.

Распределение максимальной скорости ветра по данным SMAP чётко выделяет две группы ВТЦ. Если в первую группу входит подавляющее большинство случаев с типичными значениями $W_{\text{max}} = 35-37$ м/с, то вторую составляет всего 14 % наиболее интенсивных циклонов с $W_{\text{max}} > 43$ м/с. Такое распределение предполагает наличие отдельного класса наиболее интенсивных ВТЦ с механизмом формирования экстремального ветра, отличным от первой группы. Мы допускаем, что эти циклоны развивались по типу модели Шапиро – Кейзера с образованием мезомасштабной области экстремального ветра, называемой в зарубежной литературе sting jet.

Примером служит ВТЦ с зарегистрированной SMAP скоростью ветра ~60 м/с. Это максимальная скорость для 105 рассмотренных случаев. Детальный анализ продемонстрировал основные характерные для модели Шапиро – Кейзера особенности: взрывной характер развития без смыкания холодного и тёплого фронтов у центра циклона, образование тёплого ядра в нижней тропосфере в результате секклюзии, формирование мезомасштабной области экстремальных скоростей ветра южнее центра, ориентированной вдоль траектории. Последнее указывает на мезомасштабный процесс sting jet — наиболее опасной и разрушительной особенности циклогенеза в средних широтах. Вопросы физических механизмов возникновения sting jet всё ещё актуальны, а её реалистичное воспроизведение требует усовершенствования оперативных прогностических моделей, что повышает ценность настоящего исследования.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы научно-исследовательской работы «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (регистрационный номер 121021500054-3).

Литература

- 1. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 711 с.
- 2. *Тунеголовец В. П.* Циклоническая деятельность над северо-западной частью Тихого океана и дальневосточными морями России // Дальневосточные моря России. В 4-х кн. Кн. 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 60–96.
- Bengtsson L., Hodges K. I., Roeckner E. Storm Tracks and Climate Change // J. Climate. 2006. V. 19. P. 3518–3543.
- 4. *Browning K.A.* The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2004. V. 130. P. 375–399. https://doi.org/10.1256/qj.02.143.

- 5. Burt S. D., Mansfield D. A. The Great Storm of 15–16 October 1987 // Weather. 1988. V. 43. P. 90–110.
- 6. *Chang E. K., Guo M. Y., Xia X.* CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2012. V. 117 P. D23118.
- 7. *Clark P.A., Gray S.L.* Sting jets in extratropical cyclones: a review // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2018. V. 144. P. 943–969.
- 8. *Gramcianinov C. B., Campos R. M., de Camargo R., Hodges K. I., Soares Guedes C., da Silva Dias P. L.* Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases // Ocean Engineering. 2020. V. 216. P. 108–111.
- 9. *Gyakum J. R., Anderson J. R., Grumm R. H., Gruner E. L.* North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975–1983 // Monthly Weather Review. 1989. V. 117. P. 1141–1155.
- Hawcroft M. K., Shaffrey L. C., Hodges K. I., Dacre H. F. How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Art. No. L24809. https://doi.org/10.1029/2012GL053866.
- 11. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. Hirahara S., Horányi A. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049.
- 12. *Iwao K., Inatsu M., Kimoto M.* Recent changes in explosively developing extratropical cyclones over the winter Northwestern Pacific // J. Climate. 2012. V. 25. P. 7282–7296.
- 13. *Kezunovic M., Dobson I., Dong Y.* Impact of extreme weather on power system blackouts and forced outages: New challenges // 7th Balkan Power Conf. Šibenik, Croatia. Univerza v Ljubljani, 2008. 5 p.
- Michaelis A. C., Willison J., Lackmann G. M., Robinson W.A. Changes in Winter North Atlantic Extratropical Cyclones in High-Resolution Regional Pseudo-Global Warming Simulations // J. Climate. 2017. V. 30. P. 6905–6925.
- 15. *Mizuta R.*, *Matsueda M.*, *Endo H.*, *Yukimoto S.* Future Change in Extratropical Cyclones Associated with Change in the Upper Troposphere // J. Climate. 2011. V. 24. P. 6456–6470.
- Pfahl S., O'Gorman P.A., Singh M.S. Extratropical Cyclones in Idealized Simulations of Changed Climates // J. Climate. 2015. V. 28. P. 9373–9392.
- 17. Pickart R. S., Moore G. W. K., Macdonald A. M., Renfrew I. A., Walsh J. E., Kessler W. S. Seasonal evolution of Aleutian low-pressure systems: implications for the North Pacific sub-polar circulation // J. Physical Oceanography. 2009. V. 39. P. 1316–1339.
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Mendez M. P., van den Dool H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // J. Climate. 2014. V. 27. P. 2185–2208.
- 19. *Shapiro M.A., Keyser D.* Fronts, Jet Streams, and the Tropopause // Extratropical Cyclones. The Erik Palmén Memorial Volume. Boston: American Meteorological Society, 1990. Ch. 10. P. 167–189.
- 20. Schultz D. M., Browning K. A. What is a sting jet? // Weather. 2017. V. 72. P. 63–66.
- 21. *Sinclair V.A., Rantanen M., Haapanala P., Räisänen J., Järvinen H.* The characteristics and structure of extra-tropical cyclones in a warmer climate // Weather and Climate Dynamic. 2020. No. 1. P. 1–25.
- Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Reul N., Chapron B. New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1AMSR2 // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. P. 4248–4261.
- Zappa G., Shaffrey L. C., Hodges K. I., Sansom P. G., Stephenson D. B. A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models // J. Climate. 2013. V. 26. P. 5846–5862. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1.
- 24. *Zhang S. Q., Fu G., Lu C. G., Liu J. W.* Characteristics of explosive cyclones over the Northern Pacific // J. Applied Meteorology and Climatology. 2017. V. 56. P. 3187–3210. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0330.1.

Analysis of extreme winds in intense extratropical cyclones over the North Pacific based on satellite observations from SMAP

M. K. Pichugin, I. A. Gurvich, A. V. Baranyuk

Il'yichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mails: pichugin@poi.dvo.ru, gurvich@poi.dvo.ru, vykochko@poi.dvo.ru

During the cold season, extratropical cyclones (ECs) are often associated with severe weather events, especially strong winds, extreme ocean waves and heavy precipitations. At the same time, the study of long-term changes in cyclone characteristics is hampered by gaps in observational instruments and uncertainties in cyclonic activity estimates based on both forecast models and reanalysis data sets. In this paper, the wind conditions in intense extratropical cyclones over the North Pacific Ocean are studied based on measurements from the SMAP satellite and the European Center for Medium-Range Forecasts ERA5 reanalysis and the US National Center for Environmental Prediction CFSv2 operational analysis data sets. The microwave radiometer on the SMAP satellite allows us to retreve the near the sea surface with speed up to 70 m/s, including in areas of heavy precipitation due to lutterly weak scattering and attenuation of electromagnetic waves by individual hydrometeors. The study period is limited by the satellite launch time and is 6 cold seasons (November-March) from 2015 to 2021. As a result, 105 cases of extratropical cyclones with hurricane-force (>33 m/s) winds falling within the radiometer swath were identified. Most of them (about 60 %) were recorded in December and January south of the Aleutian Islands and the Kamchatka Peninsula. Some cases of cyclogenesis (more than 40 %) demonstrated an "explosive" character and were observed mainly in the Kuroshio-Oyashio Extension area. In the most intense cases, satellite estimates of the wind showed maximum values up to 55–60 m/s. An analysis of the distribution of the maximum wind speed in the ECs exhibited a group of the most intense cyclones (about 14%) with a specific mechanism for the formation of an extreme winds. We hypothesize that these ECs followed the Shapiro-Keyser (SK) conceptual model with the formation of a meso-scale slantwise airstream, also called a "sting jet". A comparative analysis of the wind distribution in the cyclone according to SMAP and reanalyses data showed a significant underestimation by the latter in the region of high speeds of more than 25 m/s. The ERA5 reanalysis showed the most discrepancies with the satellite winds, regardless of the month or geographical area.

Keywords: satellite microwave measurements, extratropical cyclones, North Pacific, extreme winds, SMAP, sting jet

Accepted: 27.09.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-287-299

References

- 1. Zverev A.S., *Sinopticheskaya meteorologiya* (Synoptic meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 711 p. (in Russian).
- Tunegolovets V. P., Cyclonic activity over the northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas of Russia, In: *Dal'nevostochnye morya Rossii. Kniga 1. Okeanologicheskie issledovaniya* (Far Eastern Seas of Russia, Book 1, Oceanological Research), Moscow: Nauka, 2007, pp. 60–96 (in Russian).
- 3. Bengtsson L., Hodges K.I., Roeckner E., Storm Tracks and Climate Change, *J. Climate*, 2006, Vol. 19, pp. 3518–3543.
- 4. Browning K.A., The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2004, Vol. 130, pp. 375–399, https://doi.org/10.1256/qj.02.143.
- 5. Burt S. D., Mansfield D. A., The Great Storm of 15–16 October 1987, Weather, 1988, Vol. 43, pp. 90–110.
- 6. Chang E. K., Guo M. Y., Xia X., CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming, *J. Geophysical Research: Atmosphere*, 2012, Vol. 117, p. D23118.
- 7. Clark P.A., Gray S.L., Sting jets in extratropical cyclones: a review, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2018, Vol. 144, pp. 943–969.
- 8. Gramcianinov C. B., Campos R. M., de Camargo R., Hodges K. I., Soares Guedes C., da Silva Dias P. L., Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases, *Ocean Engineering*, 2020, Vol. 216, pp. 108–111.
- 9. Gyakum J. R., Anderson J. R., Grumm R. H., Gruner E. L., North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975–1983, *Monthly Weather Review*, 1989, Vol. 117, pp. 1141–1155.

- 10. Hawcroft M. K., Shaffrey L. C., Hodges K. I., Dacre H. F., How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, Art. No. L24809, https://doi.org/10.1029/2012GL053866.
- 11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, Issue 730, pp. 1999–2049.
- 12. Iwao K., Inatsu M., Kimoto M., Recent changes in explosively developing extratropical cyclones over the winter Northwestern Pacific, *J. Climate*, 2012, Vol. 25, pp. 7282–7296.
- 13. Kezunovic M., Dobson I., Dong Y., Impact of extreme weather on power system blackouts and forced outages: New challenges, 17th Balkan Power Conf., Šibenik, Croatia, Univerza v Ljubljani, 2008, 5 p.
- 14. Michaelis A. C., Willison J., Lackmann G. M., Robinson W. A., Changes in Winter North Atlantic Extratropical Cyclones in High-Resolution Regional Pseudo-Global Warming Simulations, *J. Climate*, 2017, Vol. 30, pp. 6905–6925.
- 15. Mizuta R., Matsueda M., Endo H., Yukimoto S., Future Change in Extratropical Cyclones Associated with Change in the Upper Troposphere, *J. Climate*, 2011, Vol. 24, pp. 6456–6470.
- Pfahl S., O'Gorman P.A., Singh M.S., Extratropical Cyclones in Idealized Simulations of Changed Climates, J. Climate, 2015, Vol. 28, pp. 9373–9392.
- 17. Pickart R. S., Moore G. W. K., Macdonald A. M., Renfrew I. A., Walsh J. E., Kessler W. S., Seasonal evolution of Aleutian low-pressure systems: implications for the North Pacific sub-polar circulation, *J. Physical Oceanography*, 2009, Vol. 39, pp. 1316–1339.
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Mendez M. P., van den Dool H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E., The NCEP Climate Forecast System Version 2, *J. Climate*, 2014, Vol. 27, pp. 2185–2208.
- 19. Shapiro M.A., Keyser D., Fronts, Jet Streams and the Tropopause, In: *Extratropical cyclones. The Erik Palmén Memorial Volume*, Boston: American Meteorological Society, 1990, Ch. 10, pp. 167–189.
- 20. Schultz D. M., Browning K. A., What is a sting jet? *Weather*, 2017, Vol. 72, pp. 63–66.
- 21. Sinclair V.A., Rantanen M., Haapanala P., Räisänen J., Järvinen H., The characteristics and structure of extra-tropical cyclones in a warmer climate, *Weather and Climate Dynamic*, 2020, No. 1, pp. 1–25.
- 22. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Reul N., Chapron B., New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1AMSR2, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, pp. 4248–4261.
- Zappa G., Shaffrey L. C., Hodges K. I., Sansom P. G., Stephenson D. B., A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models, *J. Climate*, 2013, Vol. 26, pp. 5846–5862, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1.
- 24. Zhang S. Q., Fu G., Lu C. G., Liu J. W., Characteristics of explosive cyclones over the Northern Pacific, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2017, Vol. 56, pp. 3187–3210, DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0330.1.