УДК 551.515.2, 551.594.2

DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.391

МОЛНИЕВАЯ АКТИВНОСТЬ В ТАЙФУНЕ ЛЕКИМА (2019) ПО ДАННЫМ ВСЕМИРНОЙ СЕТИ ЛОКАЛИЗАЦИЙ МОЛНИЙ

М.С. Пермяков, Т.И. Клещёва, Е.Ю. Поталова

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

nkichigina@mail.ru

Аннотация. В работе по данным глобальной сети локализаций молний (WWLLN) представлены сведения о молниевой активности в области тайфуна Лекима, который пересёк северо-западную часть Тихого океана со 2 по 14 августа 2019 года и оказал прямое и косвенное разрушительное влияние на страны восточной Азии. Показано, что молниевая активность, которая определяется суточным числом молний, существенно варьирует на различных стадиях эволюции циклона и в области с радиусом 1 000 км имеет два максимума. Первый максимум был зафиксирован 2 августа 2019 года на стадии тропической депрессии и составил 14 161 разряд. Второй максимум отмечен в день наибольшей интенсивности, 8 августа 2019 года, на стадии тайфуна и составил 13 066 разряд, что почти в два раза больше чем в два предшествующих дня углубления циклона и является типичной для тайфунов закономерностью в изменчивости молниевой активности. Анализ суточных композиций молниевых разрядов относительно центра циклона в области с радиусом 1 000 км показал, что формирование кольцевых и спиралевидных структур молний из бесформенных образований началось в дни быстрого углубления циклона до стадии тайфуна, а в день наибольшей интенсивности появилось скопление молний в центральной области радиусом 100 км, которое идентифицирует облачную стену «глаза».

LIGTHNING ACTIVITY IN THE TYPHOON LEKIMA (2019) ACCORDING TO THE WORLDWIDE LIGHTNING LOCATION NETWORK DATA

Mikhail S. Permyakov, Tatyana I. Kleshcheva, Ekaterina Yu. Potalova

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

nkichigina@mail.ru

Abstract. Based on the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data, this paper presents analysis of the lightning activity in the typhoon Lekima, which crossed the Northwestern Pacific Ocean 2–14 August 2019 and had destructive impact on the countries of East Asia. It is shown that lightning activity varies significantly at different stages of cyclone evolution and has two maxima within a radius of 1 000 km around the center. The first (14 161 discharges) was recorded on 2 August 2019 at Tropical Depression stage; the second (13 066 discharges) – on the day of greatest intensity on 8 August 2019, that is almost two times more than on the two previous days of cyclone deepening. The diurnal compositions of lightings relative to the cyclone center in an area with a radius of 1 000 km shows that the formation of ring and spiral structures of lightning from shapeless formations began on the days of the rapid deepening into the typhoon stage, and on the day of greatest intensity, an accumulation of lightning appeared in the central area with a radius of 100 km, which identifies the "eyewall". The presence of ring structures made it possible to demonstrate the previously published method for estimating of the eyewall characteristics according to WWLLN data. The results of the comparison of the obtained estimates with the structures of the typhoon eye cloud wall from satellite images, as well as with ones obtained from the scatterometer data and from the JMA and JTWC best tracks, are presented.

Пермяков М.С., Клещёва Т.И., Поталова Е.Ю. Молниевая активность в тайфуне Лекима (2019) по данным Всемирной сети локализаций молний // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. Вып. 4. С. 391–403. DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.391.

Наличие в этой области кольцевых структур позволило продемонстрировать ранее опубликованный метод оценки характеристик облачной стены по данным WWLLN – координат центра облачной стены и её радиуса, а также радиусов внешней и внутренней границ облачной стены. Представлены результаты сравнения полученных оценок со структурами облачной стены глаза тайфуна на спутниковом изображении, а также с такими характеристиками тайфуна, как координаты его центра, радиусами глаза и максимального ветра, полученным по данным скаттерометра ASCAT и данным бест-треков JMA и JTWC.

Ключевые слова: тайфуны; Лекима (2019); молнии; облачная стена глаза тайфуна; радиус максимального ветра; радиус облачной стены; глобальная сеть локализаций молний; скаттерометр ASCAT; Японское метеорологическое агентство; Объединённый центр предупреждения тайфунов США.

Keywords: typhoons; Lekima (2019); lightning; the typhoon eyewall; maximum wind radius; eyewall radius; World Wide Lightning Location Network; ASCAT scatterometer; Japan Meteorological Agency; Joint Typhoon Warning Center.

Введение

Тропические циклоны северо-западной части Тихого океана, зарождаясь на юге, в своей эволюции поднимаются до высоких широт, нередко оказывая катастрофическое воздействие на прибрежные территории, принося с собой разрушения, экономический ущерб и даже человеческие жертвы. Одним из последних случаев стало прохождение супертайфуна Лекима в августе 2019 года, вышедшим на восточный Китай в начале месяца, влияние которого было настолько разрушительным, что тайфуну был посвящён специальный выпуск в журнале «Frontiers of Earth Science» [1]. Интенсивные ливневые осадки, ураганный ветер вызвали сильное волнение, оползни, штормовые нагоны в 9 провинциях Китая; пострадало более 12 млн. человек, из которых погибло 56, обрушилось 13 тыс. зданий, а материальный ущерб составил более 3,7 млрд. долларов США. Тайфун не дошёл до территории России, однако обострение фронтальных зон, связанных с ним, привело к опасным гидрометеорологическим явлениям в Приморье и Хабаровском крае, где штормовая погода вызвала подъём уровня рек местами до 1,5 м, выход воды из низких берегов, подтопления автомобильных дорог и сельскохозяйственных угодий, а грозы привели к вынужденному обесточиванию жилых домов для предупреждения замыкания электропроводки [Евдокимова, 2019].

В связи с опасностью тропических циклонов, их изучение и мониторинг составляет одну из важнейших задач современной метеорологии; ряд организаций в рамках международной программы World Weather Watch [2] занимается тайфунами и ураганами по всему Мировому океану. К таким организациям относятся региональные и глобальные метеорологические центры, которые получают

[1]Frontiers of Earth Science. 2022. Vol. 16. Iss. 1. [Электронный ресурс]. URL: https://journal.hep.com.cn/fesci/EN/volumn/volumn_4009.shtml (дата обращения: 04.02.2022).
[2]World Weather Watch | World Meteorological Organization. [Электронный ресурс]. URL: https://public.wmo.int/en/programmes/world-weather-watch (дата обращения: 03.12.2021).

Permyakov M.S., Kleshcheva T.I., Potalova E.Yu. Ligthning activity in the typhoon Lekima (2019) according to the Worldwide lightning location network data. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 4, pp. 391–403. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.391.

количественные характеристики тропических циклонов в течение их эволюции и хранят их в архивах так называемых бест-треков. При этом активно применяются разнообразные дистанционные пассивные и активные методы – от наблюдений на береговых радиолокаторах до систем дистанционного зондирования и изображения тропических циклонов из космоса в различных диапазонах длин волн – видимом (далее – VIS), инфракрасном (далее – IR), микроволновом (MW) [Kossin et al., 2007; Olander, Velden, 2007; Wimmers, Velden, 2010].

Появление в последние десятилетия региональных и глобальных сетей локализации молний дало новые возможности для непрерывного мониторинга тропических циклонов над океанами, поскольку для таких циклонов характерна высокая грозовая активность, которая проявляется электрическими разрядами внутри облаков и разрядами облако – земля [Molinari et al. 1994; Molinari, Moore, Idone, 1999; Pan et al., 2010; Abarca, Corbosiero, Vollaro, 2011; DeMaria et al., 2012; Bovalo et al., 2014; Permyakov et al., 2019; Пермяков, Поталова, Клещёва, 2019]. Молниевые разряды в области тайфунов могут формировать образы, которые можно связать со структурными элементами метеорологических полей типа отдельных мезовихрей, облачной стены глаза тайфуна, облачных (дождевых) или фронтальных полос [Molinari et al.,1999; Pan et al., 2010; Пермяков и др., 2015; Пермяков и др., 2017; Vagasky, 2017; Permyakov et al., 2019]. Численный анализ полей молниевой активности в области влияния тропического циклона позволяет оценить геометрические характеристики таких структур, проследить их перемещение и эволюцию на всех стадиях развития тропических циклонов [Пермяков и др., 2015; Пермяков и др., 2017]. В нашей работе [Permyakov et al., 2019] были представлены методы оценок характеристик облачной стены глаза по данным Глобальной сети локализации молний [3] (World Wide Lightning Location Network, далее – WWLLN) [Rodger et al., 2006]. Сравнение с характеристиками тайфунов, полученными по данным скаттерометра ASCAT и данным бест-треков Японского метеорологического агентства [4] (Japan Meteorological Agency, далее – JMA) и Объединённого центра предупреждения тайфунов США [5] (Joint Typhoon Warning Center, далее – JTWC), показало, что сети локализации молний можно рассматривать как дополнительный к традиционным (спутниковым) наблюдениям инструмент в оперативной практике мониторинга тайфунов и ураганов. Это особенно важно в сложных случаях ситуации закрытия центральной области тропического циклона перистыми облаками или отсутствием глаза тайфуна.

Однако грозовая активность в тропическом циклоне имеет достаточно индивидуальный характер и может значительно меняться в разных циклонах. Целью данной работы было исследовать молниевую активность в тайфуне Лекима (2019) и на его примере продемонстрировать методы оценок характеристик облачной стены глаза тропического циклона по данным WWLLN.

Данные

Наиболее полная информация о тайфунах северо-западной части Тихого океана хранится в каталогах бест-треков JMA и JTWC. Оба каталога включают в себя основные данные о местонахождении циклона, его интенсивности и размерах. В оперативных центрах JMA и JTWC характеристики тропических циклонов определяются методом Дворака [Velden et al., 2006] и даются с 6-часовым интервалом за исключением дней наибольшей интенсивности, когда данные приведены с 3-часовым интервалом. Для уменьшения погрешности оценок характеристик тропических циклонов, все

[3]WWLLN – The World Wide Lightning Location Network. [Электронный ресурс]. URL: http://wwlln.net/ (дата обращения: 03.12.2021).
[4]Japan Meteorological Agency | RSMC Tokyo - Typhoon Center | Best Track Data. [Электронный ресурс]. URL: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html (дата обращения: 03.12.2021).
[5]NOMADS-NOAA Operational Model Archive and Distribution System. [Электронный ресурс]. URL: https://nomads.ncep.noaa.gov/ (дата обращения: 03.12.2021).

данные бест-треков проходят через пост-штормовую коррекцию с помощью реанализа с использованием всех доступных данных [Velden et al., 2006; Kishimoto, 2008]. Для оценки характеристик тропического циклона каждый центр использует свои алгоритмы, что приводит к некоторым различиям в данных JMA и JTWC. Например, из-за разных интервалов осреднения (10-минутного в JMA и 1-минутного в JTWC) максимальная скорость ветра в тайфуне по данным JMA примерно на 12% ниже, чем в данных JTWC [Knapp, Kruk, 2010], что в свою очередь влияет на определение стадии развития циклона и на решение о внесении его (или не внесении) в каталог бест-треков (из-за чего нумерация тропических циклонов в каталогах JMA и JTWC не всегда совпадает).

Тропический циклон Лекима (№1909 в списке JMA) зародился 2 августа 2019 года над Филиппинским морем и, перемещаясь на запад-северо-запад, 8 августа 2019 года достиг максимального развития со скоростью ветра более 50 м/с. В стадии супертайфуна циклон достиг восточного Китая и далее, перемещаясь на север, вышел на Жёлтое море, где заполнился 14 августа 2019 года [Евдокимова, 2019]. Для тропического циклона Лекима из бест-треков JMA была сделана выборка данных координат центра (C_{JMA}), давления в центре (P_c), максимальной скорости ветра (V_{max}), радиусов ветра 15 м/с (R_{15}) и стадии его развития (*Grade*). В таблице 1 приведены средние за сутки значения C_{JMA} и R_{15}, минимальное за сутки P_c и максимальное за сутки V_{max}, а также стадии его развития. Из бест-треков JTWC были выбраны положения центра тропического циклона (C_{JTWC}) и радиус максимального ветра (RMW_{JTWC}) за 8 августа 2019 года.

Данные WWLLN отбирались в районе прохождения тайфуна с координатами 4–50°N, 109–145°E, за период его развития от стадии тропической депрессии (далее – TD) до стадии внетропического циклона (далее – L), то есть со 2 по 14 августа 2019 года. Средняя ошибка координат молний WWLLN составляет 4,3 км (медиана 3 км), а диапазон ошибок на уровне 0,5 от максимума распределения составляет 1–6 км [Hutchins et al., 2012]. Эффективность детектирования молниевых разрядов (отношение числа молний, зарегистрированных WWLLN, к числу молний, зарегистрированных региональными сетями) после 2010 года составила 15% для всех разрядов облако – земля и >50% для разрядов с силой тока более 40 кА [Hutchins et al., 2012].

Также в работе были использованы ежедневные данные второго уровня о приводном ветре с пространственным разрешением 12,5 км, полученные по результатам сканирования морской поверхности скаттерометром ASCAT со спутника MetOp-A [Verhoef, Portabella, Stoffelen, 2012]. Массив с данными предоставляется через свободный FTP-доступ на сайте Национальной аэрокосмической администрации США[6] (NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center). Скорость ветра ASCAT даётся в диапазоне 0–50 м/с; погрешности оценок компонент скорости ветра составляют порядка 2 м/с при ветрах ниже 25 м/с и постепенно увеличиваются с возрастанием скорости ветра[7].

Результаты и обсуждение

JMA начало отслеживать тропический циклон Лекима со 2 августа на стадии тропической депрессии с давлением 1 000 гПа. На рисунке 1а представлено IR-изображение этого района, полученное в тот же день с геостационарного спутника HIMAWARI-8 в 10:30 UTC и размещённое на странице архива тропических циклонов Объединённого института спутниковых исследований Университета Висконсин-Мэдисона США[8] (далее – UW-CIMSS). Здесь же показано пространственное распределение молниевых

[6]Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) | JPL / NASA. [Электронный ресурс]. URL: https://podaac.jpl.nasa.gov/ (дата обращения: 10.12.2021).
[7]ASCAT Wind product user manual. Version 1.17. [Электронный ресурс]. URL: https://scatterometer.knmi.nl/publications/pdf/ASCAT_Product_Manual.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
[8]CIMSS Tropical Cyclones Archive [Электронный ресурс]. URL: http://tropic.ssec.wisc.edu/archive/ (дата обращения: 10.12.2021).

Таблица 1. Характеристики тайфуна Лекима по данным бест-треков JMA (характеристики тропического циклона: $\overline{C_{JMA}}$ – среднее за сутки положение центра циклона по бест-треку JMA, P_c – давление в центре, V_{max} – максимальная скорость ветра, $\overline{R_{15}}$ – средний радиус скорости ветра 15 м/с) и молниевая активность в зоне его влияния по данным WWLLN (количество молниевых разрядов N: $N_{1000\ км}$ – в радиусе 1000 км от центра, N_{R15} – в радиусе ветра 15 м/с, $N_{100\ км}$ – в радиусе 100 км от центра).

Table 1. Typhoon Lekima's the JMA best-track data characteristics (tropical cyclone characteristics: $\overline{C_{JMA}}$ – diurnal mean cyclone center coordinates from JMA best-track, P_c – central pressure, V_{max} – maximum sustained wind speed, $\overline{R_{15}}$– mean radius of 15 m/s winds) and lightning activity in TY action area according to WWLLN (Lightning discharges amount N: $N_{1000\ км}$ – in 1000 km radius from center, N_{R15} – in radius of 15 m/s wind, $N_{100\ км}$ – in 100 km radius from center).

Дата (Date)	$\overline{C_{JMA}}$		Стадия развития (Grade)	Min P_c, гПа	Max V_{max}, м/с	$\overline{R_{15}}$, км	$N_{1000\ км}$	N_{R15}	$N_{100\ км}$
	$\bar{\varphi}$, °N	$\bar{\lambda}$, °E							
2 августа	14,40	133,80	TD	1 000	—	—	14 161	—	—
3 августа	14,88	132,13	TD	998	—	—	5 910	—	375
4 августа	17,10	130,48	TD, TS	994	21	648	2 736	1 829	406
5 августа	18,15	129,80	TS, STS	985	26	648	5 265	2 913	78
6 августа	19,35	128,85	STS, TY	970	36	648	7 000	2 123	114
7 августа	21,50	127,08	TY	935	49	530	5 284	483	—
8 августа	24,28	125,08	TY	925	54	528	13 066	1 291	39
9 августа	27,30	122,30	TY, STS	940	46	556	7 550	879	1
10 августа	30,53	120,45	STS, TS	970	31	660	7 050	1 646	—
11 августа	35,40	120,05	TS	980	23	625	736	182	—
12 августа	37,40	119,68	TS, TD	985	18	333	52	1	—
13 августа	38,20	120,63	TD	996	—	—	71	—	—
14 августа	38,65	121,63	L	996	—	—	—	—	—

разрядов, выбранных за 2 августа 2019 года в области радиусом 1 000 км со средним положением центра тропического циклона Лекима по данным JMA (таблица 1). Поля облачности в IR-диапазоне, совмещённые с полями молниевых разрядов, показали очаги грозовой деятельности, соответствующие областям наиболее развитой кучевой облачности (рисунок 1a). Такие области могут представлять собой как отдельные облака, так и облачные кластеры, или даже мезомасштабные вихри, входящие в структуру тропического циклона и имеющие внутри себя вертикальные движения и циркуляцию [Simpson et al., 1997; Поталова, Пермяков, Клещёва, 2013; Пермяков и др., 2015; Пермяков, Поталова, Клещёва, 2019].

При развитии и перемещении тропических циклонов пространственное распределение молниевых разрядов за некоторый интервал времени нужно рассматривать на композиционном распределении молний в прямоугольной системе координат, помещённой в центр тропического циклона. Для этого рассчитываются координаты центра тропического циклона на момент времени каждого разряда с помощью сплайновой интерполяции по координатам из данных бест-треков JMA. На рисунке 1b показаны суточные (24-часовые) композиции молниевых разрядов относительно центра тропической депрессии 2 августа 2019 года. Такие суточные композиции были получены для всех дней, когда наблюдалась молниевая активность (2–13 августа 2019 года) в области с радиусом 1000 км. Анализ таких композиций показал, что группировка разрядов из бесформенных скоплений в кольцевые или спиралевидные структуры с высокой плотностью началась 6–7 августа 2019 года (рисунок 2a),

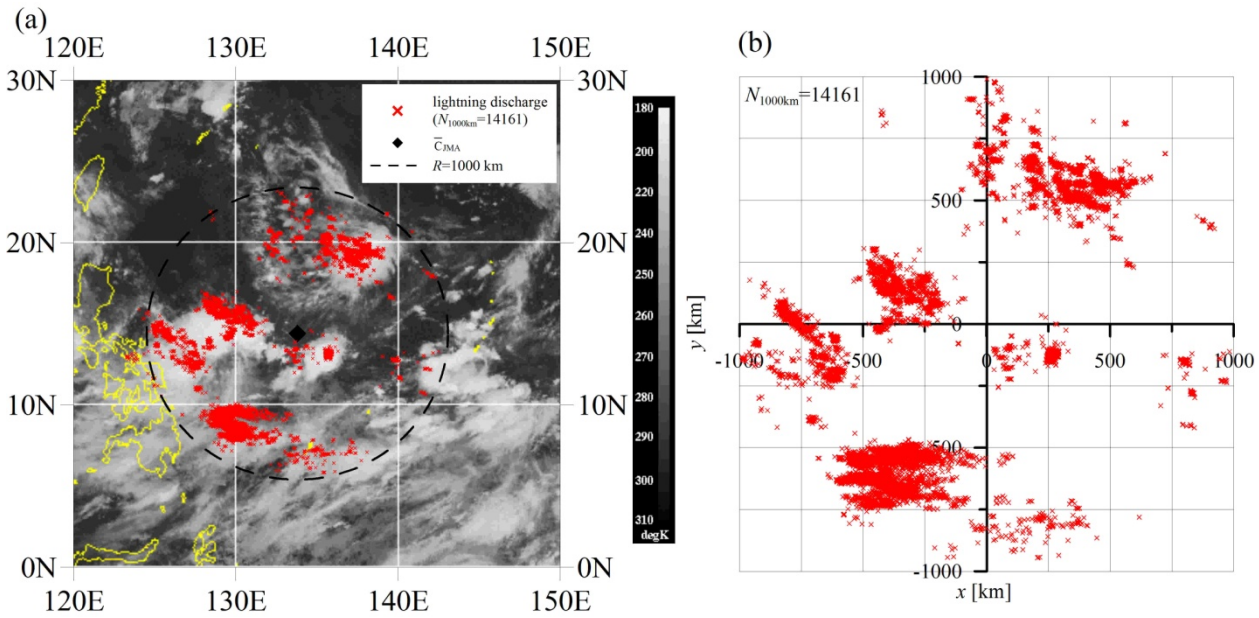

Рисунок 1. (a) HIMAWARI-8 IR-изображение тропического циклона Лекима в 10:30 UTC 2 августа 2019 года с разрядами молний; (b) Суточная (24-часовая) композиция молниевых разрядов в тропическом циклоне Лекима в радиусе 1 000 км от центра 2 августа 2019 года.

Figure 1. (a) HIMAWARI-8 IR-imagery of tropical cyclone Lekima at 10:30 UTC 2 August 2019 with lightning discharges; (b) Diurnal (24-hour) compositions of lightning discharges in 1000 km areas of tropical cyclone Lekima 2 August 2019.

когда тропический циклон Лекима достиг стадии тайфуна и на спутниковых изображениях появился его «глаз». Наиболее отчётливо кольцевые и спиральные полосы молниевых разрядов проявились в день максимальной интенсивности 8 августа 2019 года (рисунок 2b), когда P_c к концу дня понизилось до 925 гПа, а V_{max} достигло 54 м/с, и 9 августа 2019 года (рисунок 2c), когда циклон стал постепенно ослабевать (P_c к концу дня повысилось до 950 гПа, а V_{max} понизилось до 44 м/с). Также 8 августа 2019 года можно отметить появление скопления молний в центральной области тайфуна, которое идентифицирует облачную стену глаза (рисунок 2b).

При развитии и перемещении тропических циклонов пространственное распределение молниевых разрядов за некоторый интервал времени нужно рассматривать на композиционном распределении молний в прямоугольной системе координат, помещённой в центр тропического циклона. Для этого рассчитываются координаты центра тропического циклона на момент времени каждого разряда с помощью сплайновой интерполяции по координатам из данных бест-треков JMA. На рисунке 1b показаны суточные (24-часовые) композиции молниевых разрядов относительно центра тропической депрессии 2 августа 2019 года. Такие суточные композиции были получены для всех дней, когда наблюдалась молниевая активность (2–13 августа 2019 года) в области с радиусом 1000 км. Анализ таких композиций показал, что группировка разрядов из бесформенных скоплений в кольцевые или спиралевидные структуры с высокой плотностью началась 6–7 августа 2019 года (рисунок 2a), когда тропический циклон Лекима достиг стадии тайфуна и на спутниковых изображениях появился его «глаз». Наиболее отчётливо кольцевые и спиральные полосы молниевых разрядов проявились в день максимальной интенсивности 8 августа 2019 года (рисунок 2b), когда P_c к концу дня понизилось до 925 гПа, а V_{max} достигло 54 м/с, и 9 августа 2019 года (рисунок 2c), когда циклон стал постепенно ослабевать (P_c к концу дня повысилось до 950 гПа, а V_{max} понизилось до 44 м/с). Также

8 августа 2019 года можно отметить появление скопления молний в центральной области тайфуна, которое идентифицирует облачную стену глаза (рисунок 2b).

Молниевая активность, которую мы определяли суточным числом молний, заметно изменялась на различных стадиях интенсивности тайфуна (таблица 1). Максимальная молниевая активность была 2 августа 2019 года на стадии TD, когда суточное число молний в области с радиусом 1 000 км ($N_{1000\,km}$) составило 14 161 разряд. Второй максимум молниевой активности был зафиксирован 8 августа 2019 года, когда $N_{1000\,km}$ составил 13 066 разряд, что приблизительно в два раза больше, чем в два предшествующих дня углубления тайфуна Лекима со стадии Severe Tropical Storm (далее – STS) до стадии Typhoon (далее – TY) (таблица 1). Молниевая активность в области, ограниченной штормовыми ветрами 15 м/с (N_{R15}), существенно меньше, но закономерность в увеличении молниевой активности в день максимальной интенсивности в несколько раз относительно предыдущего дня сохранилась, что является достаточно типичным для тайфунов [Пермяков и др., 2015].

Наибольший интерес в тайфуне представляет его центральная область радиусом 100 км, так как характеристики именно этой области, особенно координаты центра, радиусы максимального ветра и радиус глаза, являются основными для штормовых сводок и численного прогноза. В центральной области тайфуна мощные конвективные облака пронизывают всю тропосферу и образуют облачную стену глаза, в которой точки разрядов могут образовывать кольцевые структуры – кольца или их части [Permyakov et al., 2019; Vagasky, 2017]. Кольцевые структуры молний позволяют практически в реальном масштабе времени оценивать геометрические характеристики облачной стены (координаты центра и радиус), прослеживать их перемещение и эволюцию. В нашей работе [Permyakov et al., 2019] мы представили методы их оценок, которые, вкратце, основаны на аппроксимации распределения множества точек молниевых разрядов окружностью, задаваемой её параметрами: координатами центра (далее – C_{WWLLN}) и радиусом (далее – RCW). Для их оценок используется численная процедура минимизации суммарного расстояния точек разрядов до аппроксимирующей окружности. По радиальным распределениям разрядов можно оценить радиусы внутренней ($RIN=RCW-2\sigma_p$) и внешней границ стены ($ROUT=RCW+2\sigma_p$), где σ_p – среднеквадратичное расстояние точек разрядов от радиуса RCW.

Однако, как было отмечено в нашей работе [Permyakov et al., 2019], эти методы могут быть реализованы только при достаточно большом числе молний в центральной области зрелых интенсивных тропических циклонов. Тайфун Лекима характеризуется очень низкой молниевой активностью в центральной части. Как видно из таблицы 1, молниевая активность в центральной части тропического циклона началась 3 августа 2019 года на стадии TD, продолжалась в общей сложности 6 дней и закончилась 9 августа 2019 года на стадии STS. Суточное число молний в центральной части варьировало от 1 до 406 разрядов, а в день его максимальной интенсивности, 8 августа 2019 года, составило всего 39 разрядов. Для сравнения: в тайфуне Хайян (2013) в день наибольшей интенсивности, 7 ноября 2013 года, было зарегистрировано 5 704 молнии [Permyakov et al., 2019]. Тем не менее на суточной и 2-часовой композициях разрядов в центральной 100-км области они образовали кольцевую структуру, что позволило нам получить геометрические характеристики облачной стены и сравнить их с оценками координат центра тайфуна Лекима и радиуса максимального ветра, полученными по данным ASCAT, так как в зрелых тайфунах и ураганах положения облачной стены и области максимальных ветров очень близки [Houze, 2010], а также по данным бест-треков JMA и JTWC, так как они в основном проводятся по анализу облачности на IR и VIS изображениях.

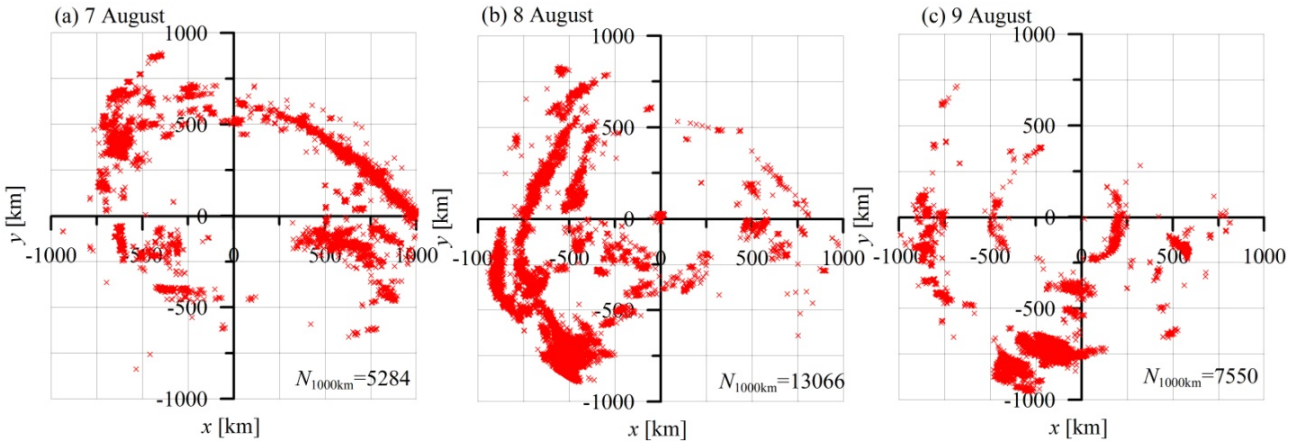

Рисунок 2. Суточные (24-часовые) композиции молниевых разрядов в тайфуне Лекима в радиусе 1000 км от центра 7–9 августа 2019 года.
Figure 2. Diurnal (24-hour) compositions of lightning discharges in 1000 km areas of typhoon Lekima 7–9 August 2019.

На рисунке 3a представлено изображение тайфуна Лекима в видимом диапазоне, полученное со спутника HIMAWARI-8 8 августа 2019 года в 12:00 UTC с сайта UW-CIMSS. Здесь же показаны полоса сканирования скаттерометра ASCAT/MetOp-A и квадрат с выбранными данными. Сканирование в выбранном квадрате проводилось с 11:54:41 по 11:55:56 UTC, то есть приблизительно за 5 минут до снимка. Для оценки характеристик облачной стены глаза тайфуна Лекима по данным ASCAT компоненты ветра сначала пересчитывались в прямоугольную систему координат (x, y) с началом в центре выделенного квадрата и направлением оси ординат вдоль полосы сканирования. Затем по полю скорости ветра в прямоугольной системе (рисунок 3b) оценивались координаты центра тайфуна (C_{ASCAT}) и радиус его максимального ветра (RMW_{ASCAT}) с помощью корреляционного метода, описанного в наших работах [Пермяков, Клещёва, Поталова, 2018; Permyakov et al., 2019].

На поле скорости ветра (рисунок 3b) и соответствующей части изображения (рисунок 3c) тайфуна Лекима мы нанесли характеристики облачной стены, полученные по 2-часовым композициям молний WWLLN (то есть время данных ASCAT ±1 час). Наши оценки составили

RCW=32,7 км и C_{WWLLN}=(124,94°E, 24,38°N)

и, как видно из рисунка, они хорошо согласуются со структурами облачной стены глаза тайфуна в поле ветра ASCAT и на спутниковом изображении. Полученный центр облачной стены по данным WWLLN попал в область глаза тайфуна Лекима, который в поле ветра характеризуется более низкими значениями скорости (белый пунктир на рисунке 3b), а на VIS изображении чётко выделяется как свободное от облачности тёмное пятно. Окружность с радиусом RCW проходит через области максимальных скоростей ветра, но смещена на ~19 км относительно окружности с радиусом максимального ветра RMW_{ASCAT}=33,3 км и центром C_{ASCAT}=(124,79°E, 24,48°N). Отметим, что такая величина расхождения (C_{WWLLN}–C_{ASCAT}) является среднеарифметической для 39 тайфунов за период с 2011 по 2015 год [Permyakov et al., 2019]. Согласно данным бест-треков, центр тайфуна Лекима, полученный на время данных ASCAT с помощью сплайновой интерполяции, находился в точке с координатами

C_{JMA}=(125,01°E, 24,29°N)

и

C_{JTWC}=(124,90°E, 24,39°N),

то есть расхождение между центром облачной стены глаза и центром тайфуна составили (C_{WWLLN}–C_{JMA})=11,8 км и (C_{WWLLN}–C_{JTWC})=4 км, что существенно ниже средних величин 16 и 17 км, соответственно [Permyakov et al., 2019]. Среднеквадратичное расстояние разрядов от радиуса RCW составило по нашим оценкам 11,7 км, отсюда радиус внутренней границы

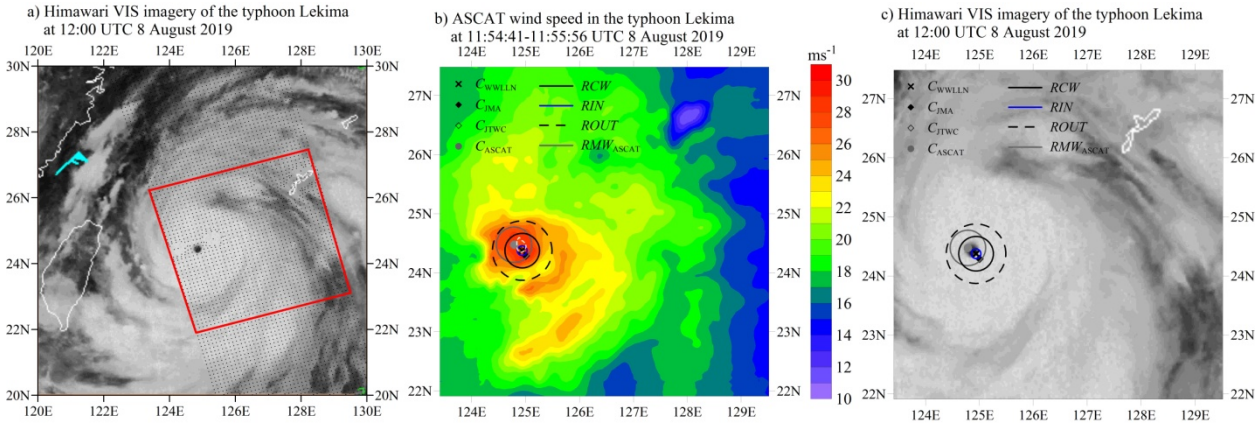

Рисунок 3. a), c) VIS–изображение тайфуна Лекима со спутника HIMAWARI-8 8 августа 2019 года в 12:00 UTC с полосой сканирования скаттерометра ASCAT/MetOp-A (черные точки) и квадратом выбранных данных (красным); b) Приводная скорость ветра ASCAT в выбранном квадрате 8 августа 2019 года в 11:54:41 – 11:55:56 UTC с характеристиками облачной стены глаза, полученными по данным WWLLN, ASCAT, JMA и JTWC.

Figure 3. a), c) HIMAWARI-8 VIS imagery of the typhoon Lekima at 12:00 UTC 8 August 2019 with scatterometer ASCAT/MetOp-A swatch (black points) and the data selection area (red); b) the ASCAT wind speed in the selected area at 11:54:41 –11:55:56 UTC 8 August 2019 with the eyewall characteristics according to the data of WWLLN, ASCAT, JMA and JTWC.

облачной стены глаза *RIN*=9,3 км, что очень близко к грубой оценке радиуса глаза тайфуна на изображении в видимом диапазоне на рисунке 3c (приблизительно 9 км) и к величине RMW_{JTWC}=9 км. Отметим, что радиусы максимального ветра по данным JTWC (RMW_{JTWC}) в среднем на 14,8 км меньше радиуса облачной стены по данным WWLLN [Permyakov et al., 2019]. Радиус внешней границы облачной стены глаза *ROUT* составил ~ 56 км и, как видно на рисунке 3b, окружность с радиусом *ROUT* охватывает область максимальных ветров ASCAT вокруг глаза тайфуна Лекима.

Заключение

В работе на основе современных данных (WWLLN, ASCAT) анализируется молниевая активность в области тропического циклона Лекима, который действовал над северо-западной частью Тихого океана со 2 по 14 Августа 2019 года. Показано, что формирование кольцевых и спиралевидных структур молний началось в дни быстрого углубления циклона до стадии тайфуна и появления на спутниковых изображениях «глаза». В день максимальной интенсивности отмечено увеличение молниевой активности в несколько раз по сравнению с предыдущим днём и появление скопления молний в центральной области тайфуна, которое идентифицирует облачную стену глаза. Показано, что молниевая активность в центральной 100-километровой области тайфуна Лекима началась на стадии тропической депрессии, продолжалась в общей сложности 6 дней и закончилась на следующий день после достижения максимальной интенсивности, на стадии сильного тропического шторма. Наличие кольцевых структур в центральной области позволило продемонстрировать ранее опубликованный метод оценки характеристик облачной стены по данным WWLLN и сравнить полученные оценки координат центра облачной стены и её радиуса с координатами центра тропического циклона и радиусом максимального ветра, оценённым, прежде всего, по данным ветра ASCAT. Показано, что радиусы облачной стены и радиус максимального ветра составляют ~33 км, расхождение центров составляет 19 км, при этом они попадают в область глаза на спутниковом изображении. Показано, что радиус внутренней границы облачной стены по данным WWLLN составил ~9 км, что согласуется с грубой оценкой радиуса глаза на спутниковом изображении.

Результаты показывают, что данные WWLLN можно использовать при оценке основных характеристик центральной части тропических циклонов в качестве дополнительных к традиционным методам.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы №121021500054–3 «Технология дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере».

Литература

Евдокимова Л.И. Тропические циклоны // Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. 2019. Август. С. 5-1–5-21.

Пермяков М.С., Клещёва Т.И., Поталова Е.Ю. Оценки характеристик облачной стены глаза тайфунов по данным скаттерометров ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №7. С. 249–258. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-249-258.

Пермяков М.С., Поталова Е.Ю., Дрога А.Н., Шевцов Б.М. Поля молниевых разрядов в тайфунах // Исследования Земли из Космоса. 2017. № 4. С. 59–67. DOI: 10.7868/S0205961417040066.

Пермяков М.С., Поталова Е.Ю., Клещёва Т.И. Грозовая активность в Приморском крае // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 43–52.

Пермяков М.С., Поталова Е.Ю., Шевцов Б.М., Чернева Н.В., Holzworth R.H. Грозовая активность и структура тропических циклонов // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 7. С. 638–643. DOI: 10.15372/AOO20150706.

Поталова Е.Ю., Пермяков М.С., Клещёва Т.И. Мезомасштабная структура тропических циклонов в поле приводного ветра // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 22–29.

Abarca S.F., Corbosiero K.L., Vollaro D. The World Wide Lightning Location Network and convective activity in tropical cyclones // Monthly Weather Review. 2011. Vol. 139. Iss. 1. Pp. 175–191. DOI: 10.1175/2010MWR3383.1.

References

Evdokimova L.I. Tropicheskie tsiklony [Tropical cyclones]. *Ezhemesyachnyi gidrometeorologicheskii byulleten' DVNIGMI [Monthly hydrometeorological bulletin of the Far Eastern Research Institute]*, 2019, August, pp. 5-1–5-21. (In Russian).

Abarca S.F., Corbosiero K.L., Vollaro D. The World Wide Lightning Location Network and convective activity in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 2011, vol. 139, iss. 1, pp. 175–191. DOI: 10.1175/2010MWR3383.1.

Bovalo C., Barthe C., Yu N., Bègue N. Lightning activity within tropical cyclones in the South West Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, vol. 119, iss. 13, pp. 8231–8244. DOI: 10.1002/2014JD021651.

DeMaria M., DeMaria T.R., Knaff J.A., Molenar D. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change. *Monthly Weather Review*, 2012, vol. 140, iss. 6, pp. 1828–1842. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00236.1.

Houze R.A. Jr. Clouds in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 2010, vol. 138, iss. 2, pp. 293–344. DOI: 10.1175/2009MWR2989.1.

Hutchins M.L., Holzworth R.H., Rodger C.J., Heckman S., Brundell J.B. WWLLN Absolute Detection Efficiencies and the Global Lightning Source Function. *Geophysical Research Abstracts,* 2012, vol. 14, p. 12917.

Kishimoto K. Revision of JMA's Early Stage Dvorak Analysis and Its Use to Analyze Tropical Cyclones in the Early Developing Stage. *RSMC Tokyo-Typhoon Center. Technical Review*, 2008, no. 10, pp. 1–12.

Bovalo C., Barthe C., Yu N., Bègue N. Lightning activity within tropical cyclones in the South West Indian Ocean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. Vol. 119. Iss. 13. Pp. 8231–8244. DOI: 10.1002/2014JD021651.

DeMaria M., DeMaria T.R., Knaff J.A., Molenar D. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change // Monthly Weather Review. 2012. Vol. 140. Iss. 6. Pp. 1828–1842. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00236.1.

Houze R.A. Jr. Clouds in tropical cyclones // Monthly Weather Review. 2010. Vol. 138. Iss. 2. Pp. 293–344. DOI: 10.1175/2009MWR2989.1.

Hutchins M.L., Holzworth R.H., Rodger C.J., Heckman S., Brundell J.B. WWLLN Absolute Detection Efficiencies and the Global Lightning Source Function // Geophysical Research Abstracts. 2012. Vol. 14. P. 12917.

Kishimoto K. Revision of JMA's Early Stage Dvorak Analysis and Its Use to Analyze Tropical Cyclones in the Early Developing Stage // RSMC Tokyo-Typhoon Center. Technical Review. 2008. No. 10. Pp. 1–12.

Knapp K.R., Kruk M.C. Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates // Monthly Weather Review. 2010. Vol. 138. Iss. 4. Pp. 1459–1473. DOI: 10.1175/2009MWR3123.1.

Kossin J.P, Knaff J.A., Berger H.I., Herndon D.C., Cram Th.A., Velden Ch.S., Murnane R.J., Hawkins J.D. Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance // Weather and Forecasting. 2007. Vol. 22. Iss. 1. Pp. 89–101. DOI: 10.1175/WAF985.1.

Molinari J., Moore P.K., Idone V.P., Henderson R.W., Saljoughy A.B. Cloud-to-ground lightning in hurricane Andrew // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1994. Vol. 99. Iss. D8. Pp. 16665–16676. DOI: 10.1029/94JD00722.

Molinari J., Moore P., Idone V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations // Monthly Weather Review. 1999. Vol. 127. Iss. 4. Pp. 520–534. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0520:CSOHAR>2.0.CO;2.

Knapp K.R., Kruk M.C. Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates. *Monthly Weather Review*, 2010, vol. 138, iss. 4, pp. 1459–1473. DOI: 10.1175/2009MWR3123.1.

Kossin J.P, Knaff J.A., Berger H.I., Herndon D.C., Cram Th.A., Velden Ch.S., Murnane R.J., Hawkins J.D. Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance. *Weather and Forecasting*, 2007, vol. 22, iss. 1, pp. 89–101. DOI: 10.1175/WAF985.1.

Molinari J., Moore P.K., Idone V.P., Henderson R.W., Saljoughy A.B. Cloud-to-ground lightning in hurricane Andrew. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, vol. 99, iss. D8, pp. 16665–16676. DOI: 10.1029/94JD00722.

Molinari J., Moore P., Idone V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations. *Monthly Weather Review*, 1999, vol. 127, iss. 4, pp. 520–534. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0520:CSOHAR>2.0.CO;2.

Olander T.L., Velden C.S. The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery. *Weather and Forecasting*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 287–298. DOI: 10.1175/WAF975.1.

Pan L.X., Qie X.S., Liu D.X., Wang D.F., Yang J. The lightning activities in super typhoons over the Northwest Pacific. *Science China Earth Sciences*, 2010, vol. 53, iss. 8, pp. 1241–1248. DOI: 10.1007/s11430-010-3034-z.

Permyakov M.S., Kleshcheva T.I., Potalova E.Yu. Otsenki kharakteristik oblachnoi steny glaza taifunov po dannym skatterometrov ASCAT [Estimates of the characteristics of cloud wall of the typhoon eye according to ASCAT scatterometers data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2018, vol. 15, no. 7, pp. 249-258. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-249-258.

Olander T.L., Velden C.S. The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery // Weather and Forecasting. 2007. Vol. 22. Iss. 2. Pp. 287–298. DOI: 10.1175/WAF975.1.

Pan L.X., Qie X.S., Liu D.X., Wang D.F., Yang J. The lightning activities in super typhoons over the Northwest Pacific // Science China Earth Sciences. 2010. Vol. 53. Iss. 8. Pp. 1241–1248. DOI: 10.1007/s11430-010-3034-z.

Permyakov M., Kleshcheva T., Potalova E., Holzworth R.H. Characteristics of typhoon eyewalls according to World Wide Lightning Location Network data // Monthly Weather Review. 2019. Vol. 147. Iss. 11. Pp. 4027–4043. DOI: 10.1175/MWR-D-18-0235.1.

Rodger C.J., Werner S., Brundell B.J., Lay E.H., Thomson N.R., Holzworth R.H., Dowden R.L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study // Annales Geophysicae. 2006. Vol. 24. Iss. 12. Pp. 3197–3214. DOI: 10.5194/angeo-24-3197-2006.

Simpson J., Ritchie E., Holland G.J., Halverson J., Stewart S. Mesoscale interactions in tropical cyclones genesis // Monthly Weather Review. 1997. Vol. 125. Iss. 10. Pp. 2643–2661. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<2643:MIITCG>2.0.CO;2.

Vagasky Ch. Enveloped eyewall lightning: The EEL Signature in tropical cyclones // Journal of Operational Meteorology. 2017. Vol. 5. No. 14. Pp. 171–179. DOI: 10.15191/nwajom.2017.0514.

Velden Ch., Harper B., Wells F., Beven J.L. II, Zehr R., Olander T., Mayfield M., Guard Ch., Lander M., Edson R., Avila L., Burton A., Turk M., Kikuchi A., Christian A., Caroff Ph., McCrone P. The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: A satellite-based method that has endured for over 30 years // Bulletin of the American Meteorological Society. 2006. Vol. 87. Iss. 9. Pp. 1195–1210. DOI: 10.1175/BAMS-87-9-1195.

Permyakov M., Kleshcheva T., Potalova E., Holzworth R.H. Characteristics of typhoon eyewalls according to World Wide Lightning Location Network data. *Monthly Weather Review*, 2019, vol. 147, iss. 11, pp. 4027–4043. DOI: 10.1175/MWR-D-18-0235.1.

Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Droga A.N., Shevtsov B.M. Fields of lightnings discharges in typhoons. *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 54, iss. 9, pp. 1194–1201. DOI: 10.1134/S0001433818090268. (Russ. ed.: Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Droga A.N., Shevtsov B.M. Polya molnievykh razryadov v taifunakh. *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2017, no. 4, pp. 59–67. DOI: 10.7868/S0205961417040066).

Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Kleshcheva T.I. Thunderstorm activity in the Primorsky krai. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, no. 12, pp. 818–824. DOI: 10.3103/S1068373919120045. (Russ. ed.: Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Kleshcheva T.I. Grozovaya aktivnost' v Primorskom krae. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 12, pp. 43–52).

Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Shevtsov B.M., Cherneva N.V., Holzworth R.H. Thunderstorm activity and the structure of tropical cyclones. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, vol. 28, iss. 6, pp. 585–590. DOI: 10.1134/S1024856015060123. (Russ. ed.: Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Shevtsov B.M., Cherneva N.V., Holzworth R.H. Grozovaya aktivnost' i struktura tropicheskikh tsiklonov. *Optika atmosfery i okeana*, 2015, vol. 28, no. 7, pp. 638–643. DOI: 10.15372/AOO20150706).

Potalova E.Y., Permyakov M.S., Kleshcheva T.I. Mesoscale structure of tropical cyclones in the surface wind field. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, iss. 11, pp. 735–740. DOI: 10.3103/S1068373913110022. (Russ. ed.: Potalova E.Yu., Permyakov M.S., Kleshcheva T.I. Mezomasshtabnaya struktura tropicheskikh tsiklonov v pole privodnogo vetra. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, no. 11, pp. 22–29).

Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A. High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. Iss. 7. Pp. 2481–2487. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.

Wimmers A.J., Velden C.S. Objectively determining the rotational center of tropical cyclones in passive microwave satellite imagery // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2010. Vol. 49. Iss. 9. Pp. 2013–2034. DOI: 10.1175/2010JAMC2490.1.

Rodger C.J., Werner S., Brundell B.J., Lay E.H., Thomson N.R., Holzworth R.H., Dowden R.L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study. *Annales Geophysicae*, 2006, vol. 24, iss. 12, pp. 3197–3214. DOI: 10.5194/angeo-24-3197-2006.

Simpson J., Ritchie E., Holland G.J., Halverson J., Stewart S. Mesoscale interactions in tropical cyclones genesis. *Monthly Weather Review*, 1997, vol. 125, iss. 10, pp. 2643–2661. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<2643:MIITCG>2.0.CO;2.

Vagasky Ch. Enveloped eyewall lightning: The EEL Signature in tropical cyclones. *Journal of Operational Meteorology*, 2017, vol. 5, no. 14, pp. 171–179. DOI: 10.15191/nwajom.2017.0514.

Velden Ch., Harper B., Wells F., Beven J.L. II, Zehr R., Olander T., Mayfield M., Guard Ch., Lander M., Edson R., Avila L., Burton A., Turk M., Kikuchi A., Christian A., Caroff Ph., McCrone P. The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: A satellite-based method that has endured for over 30 years. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, vol. 87, iss. 9, pp. 1195–1210. DOI: 10.1175/BAMS-87-9-1195.

Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A. High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, vol. 50, iss. 7, pp. 2481–2487. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.

Wimmers A.J., Velden C.S. Objectively determining the rotational center of tropical cyclones in passive microwave satellite imagery. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, vol. 49, iss. 9, pp. 2013–2034. DOI: 10.1175/2010JAMC2490.1.