

Грозовая активность и структура тропических циклонов

М.С. Пермяков^{1,2}, Е.Ю. Поталова^{1,2}, Б.М. Шевцов³,
Н.В. Чернева³, Р.Н. Holzworth^{4*}

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

²Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия

³Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Камчатский край, Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

⁴World Wide Lightning Location Network, Университет Вашингтона
ESS Box 351310, Johnson Hall Room 70, Seattle, WA 98195-1310, USA

Поступила в редакцию 2.12.2014 г.

Синоптические и мезомасштабные циклонические системы над океаном и морями часто сопровождаются грозовой активностью, интенсивность и пространственное распределение которой модулируется динамической структурой этих систем. Грозовые разряды являются источниками электромагнитного излучения в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) и регистрируются ОНЧ-пеленгаторами. С использованием Всемирной сети локализации гроз World Wide Lightning Location Network (WWLLN) на примере тропических циклонов изучаются связи характеристик полей регистрируемых грозовых разрядов в северо-западной части Тихого океана с характеристиками полей метеорологических элементов погодных образований, оцениваемых по данным дистанционного зондирования Земли со спутников. Иллюстрируется методика, позволяющая связывать параметры грозовой активности (частоту и интенсивность, пространственное распределение грозовых разрядов) со структурой погодных систем над океанами и морями, с интенсивностью и формами мезомасштабных образований в этих системах, выделяемых по полям вихря приводного ветра, полученным скаттерометром, и по спутниковым изображениям в видимом и инфракрасном диапазонах. На примере отдельных тропических циклонов (ТЦ) 2005–2013 гг. демонстрируются связи частоты и плотности молниевых разрядов в области влияния ТЦ с пространственным распределением вихря приводного ветра.

Ключевые слова: тропические циклоны, грозовая активность, локализация гроз, электромагнитное излучение очень низких частот; tropical cyclones, thunderstorms activity, lightning localization, very low frequency radiation.

Введение

В исследованиях и мониторинге циклонических вихревых образований (от тропических до полярных циклонов) над океанами и морями в настоящее время широко применяются разнообразные дистанционные пассивные и активные методы – от наблюдений на береговых радиолокаторах до систем зондирования океана и атмосферы из космоса в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения. Для мониторинга циклонов с глубокой конвективной облачностью («горячие башни» в тропических циклонах) в последние десятилетия развиваются довольно экономичные пассивные методы, связанные с функционированием в ряде стран национальных сетей пеленгаторов и регистраторов молниевых разрядов и появлением мировой сети локализации гроз, ис-

пользующих диапазон электромагнитных волн очень низких частот (ОНЧ, 3–30 кГц) [1–4].

Пространственно-временное распределение молниевых разрядов отражает процессы масштаба грозовых облаков, которые контролируются динамическими и термодинамическими структурами синоптического (порядка 1000 км) и мезометеорологического масштабов (10–200 км). При этом над океанами и морями вдали от берегов и островов в отличие от материковых гроз отсутствует влияние орографии. Поэтому здесь, несмотря на то что частота молниевых разрядов на порядок меньше, чем над материками, интерпретация данных о грозовых разрядах и связи их пространственного распределения с полями метеоэлементов могут быть более определенными и устойчивыми. Для отдельного циклона координаты молниевых разрядов, выбранные в области его влияния за определенный период, при достаточно большом их числе формируют точечные образы, которые можно идентифицировать с известными структурными элементами метеорологических полей типа отдельных мезовихрей, облачной стены «глаза» тайфуна, облачных (дождевых) или фронтальных полос.

* Михаил Степанович Пермяков (permyakov@poi.dvo.ru); Екатерина Юрьевна Поталова (gata@poi.dvo.ru); Борис Михайлович Шевцов (bshhev@ikir.ru); Нина Володаровна Чернева (nina@ikir.ru); Robert Nավiland Holzworth (bobholz@uw.edu).

Численный анализ таких данных позволяет оценить геометрические характеристики выделенных объектов, проследить их перемещение и эволюцию.

В настоящей статье представлены некоторые предварительные результаты подобных исследований на основе анализа данных Всемирной сети локализации гроз (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) для отдельных тропических циклонов (ТЦ) в северо-западной части Тихого океана.

Данные и методы

Мы использовали данные сети локализации гроз WWLLN [5], которая функционирует с 2003 г. и в настоящее время включает в себя около 80 приемных станций на всех континентах. Эти данные содержат координаты и время (после предобработки и фильтрации) зарегистрированных грозовых разрядов в атмосфере с точностью ~ 5 км и 10^{-6} с. При анализе связи грозовой активности как метеорологического параметра с полями других метеорологических элементов ее распределение по области влияния ТЦ за определенный интервал времени (порядка 1 ч) представляется плотностью грозовых разрядов на единицу площади.

По координатам центра ТЦ в области его влияния (квадрат $\sim 10 \times 10^\circ$ ш.) делается выборка данных WWLLN в определенном интервале времени и рассчитывается плотность грозовых разрядов в узлах регулярной прямоугольной сетки с заданным шагом по числу точек молниевых разрядов, попадающих в круг заданного радиуса с центром в текущем узле. Все разряды, попавшие в круг, суммируются с весами, зависящими от модуля разности заданного момента времени и времени отдельного разряда в данных WWLLN и расстояния до сеточного узла. Используются гауссовы весовые функции с заданной шириной ~ 10 км. Для временной функции ширина равна ~ 1 ч, что сравнимо с характерным временем развития мощных конвективных облаков. Это значение может меняться в зависимости от частоты разрядов.

Для пространственной весовой функции полуширина равна 10 км и сравнима с характерным диаметром грозовых облаков в ТЦ, она определяет степень пространственного сглаживания и может изменяться в зависимости от конкретной задачи обработки. В результате получаем поле плотности разрядов, или поле грозовой активности. Анализ такого поля позволяет выделять структурные элементы, которые ассоциируются с метеорологическими объектами. Так, экстремумы в поле грозовой активности соответствуют областям скопления грозовых ячеек и могут быть прямо связаны с мощными облаками глубокой конвекции, которые в поле ветра или вихря скорости ветра будут проявляться как достаточно интенсивные мезомасштабные вихри [6].

Выборка всех данных проводилась в районах зарождения и эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана в 2005–2013 гг. Характеристики ТЦ (координаты центра, минимальное приземное давление, максимальная скорость

ветра и др.) в стандартные сроки выбраны из архивов Tropical Cyclone Best Track Японского метеорологического агентства (JMA) [7] и Гавайского центра Joint Typhoon Warning Center (JTWC) [8]. Все выбранные циклоны в своей эволюции достигали интенсивности тайфунов (скорость ветра более 33 м/с). Структура ТЦ анализировалась по полю вихря приводного ветра [6]. Использовались данные по скорости и направлению приводного ветра скаттерометров QuikSCAT, а также данные пассивного поляриметрического микроволнового радиометра WindSat, доступные на сайте Remote Sensing Systems [9].

Устойчивые структуры в движущемся ТЦ проявляются при построении распределения разрядов и поля грозовой активности в системе координат, помещенной в центр ТЦ. При этом значительно уменьшается «размазка» картины разрядов, связанная с перемещением циклона за временной интервал выборки. Для этого рассчитываются координаты центра ТЦ на момент каждого разряда в выбранных данных. Используется интерполяция на временной сетке кубическими сплайнами отдельно данных по широте и долготе центра ТЦ из архивов Tropical Cyclone Best Track. Полученные за определенный интервал времени (обычно это сутки или несколько часов) распределения разрядов и поля грозовой активности будем называть композиционными по аналогии с «композиционными» ТЦ [10], в которых малочисленные и разрозненные данные аэрологического зондирования в разных ТЦ были интегрированы в единой цилиндрической системе координат с началом в центре ТЦ и которые позволили получить осредненную структуру ТЦ на разных стадиях их развития.

Результаты и обсуждение

При анализе и интерпретации данных сети WWLLN следует иметь в виду, что в силу разных причин в ней регистрируется лишь часть молниевых разрядов. Так, в [4] указывается, что эффективность регистрации разрядов $\sim 10\%$ и практически повсеместно частота разрядов имеет суточный ход, который частично может быть связан с особенностями распространения радиоимпульсов грозовых разрядов (атмосфериков) в волноводе «поверхность Земли – ионосфера», с методами их регистрации и обработки. Несмотря на это распределения зарегистрированных в сети WWLLN разрядов и построенные по ним поля грозовой деятельности дают возможность выявлять элементы структуры ТЦ, оценивать их характеристики и параметры самого ТЦ. Ниже приведены отдельные результаты обработки, иллюстрирующие, как структура и динамика ТЦ отражаются в полях грозовых разрядов, регистрируемых сетью WWLLN.

На рис. 1 показано распределение молниевых разрядов для тайфуна Haitang (№ 0505) в день его максимальной интенсивности 16 июля 2005 г. Здесь же для сравнения показано поле облачности на спутниковом изображении на 6 ч 16 июля [11]. В распределении разрядов просматриваются характерные

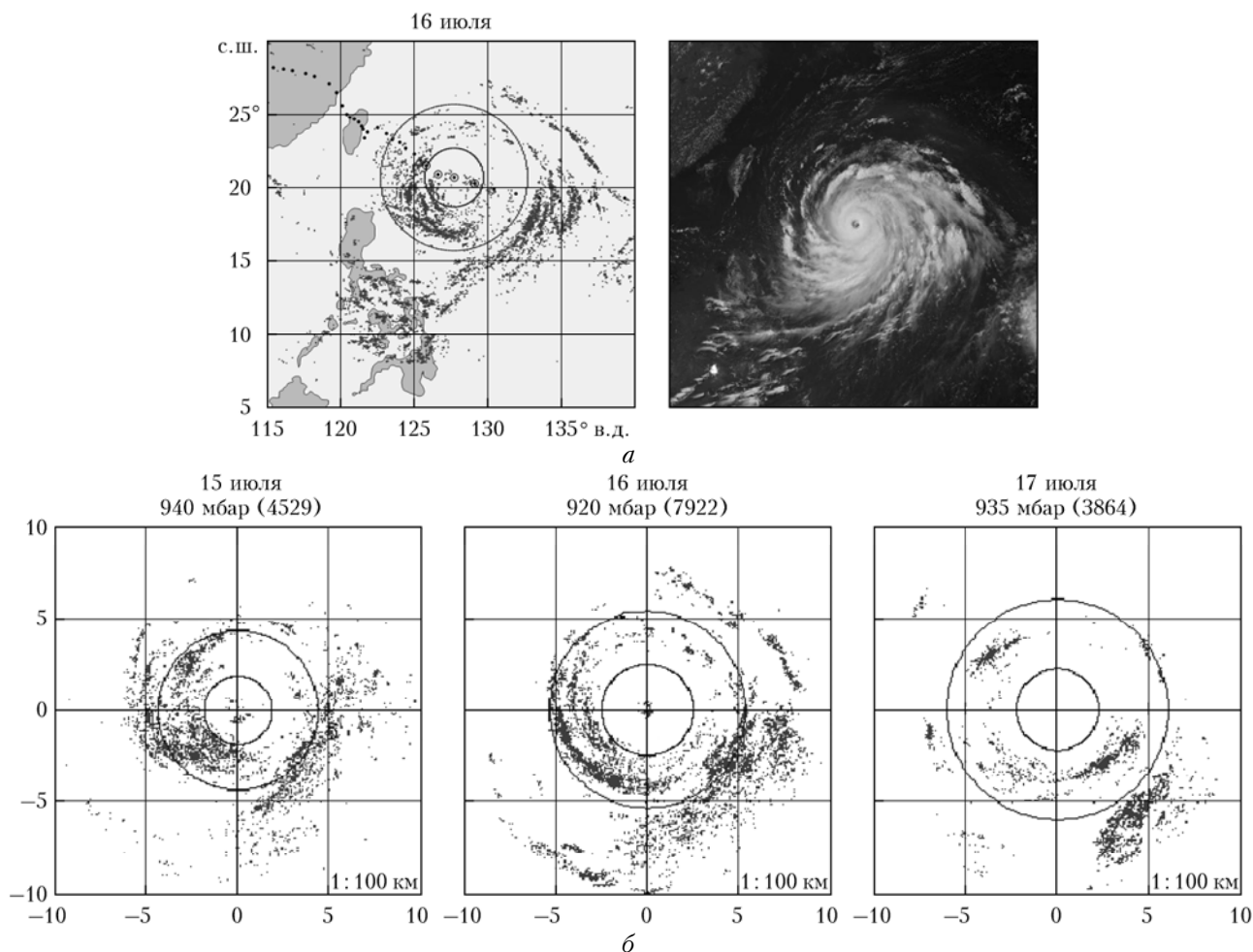


Рис. 1. Вид ТЦ Haitang и распределение молниевых разрядов в районе его влияния в момент максимального развития 16 июля 2005 г. (а); распределение молниевых разрядов в циклоне в момент максимального развития, а также в день до и после (б). Указаны минимальное давление в центре и количество молниевых разрядов (в скобках)

элементы структуры тайфуна — облачные спиральные полосы, которые можно отметить и в поле облачности. На рис. 1, а в левом нижнем углу выделяются кластеры разрядов, которые демонстрируют грозовую активность в наиболее прогретом районе Тихого океана и связаны с контрастами между океаном и многочисленными островами архипелага.

На рис. 1, б представлены композиционные распределения разрядов для трех суток и видны изменения в структуре полей грозовой активности. Здесь же указаны давление в центре тайфуна и число разрядов в области радиусом 1000 км. Гистограммы распределения (не показаны) разрядов за период с 10 по 21 июля эволюции этого ТЦ от стадии зарождения до стадии заполнения демонстрируют типичный ход грозовой активности в ТЦ: в дни углубления и максимального развития значительно возрастает грозовая активность в области ТЦ. В день максимальной интенсивности тайфуна, когда ТЦ достигает интенсивности тайфуна, число (и плотность) разрядов более чем в 2 раза превышает таковую в два предшествующих дня углубления ТЦ. Все три дня четко проявляется суточный ход с максимумом в вечернее (местное) время.

Пример расчета поля плотности разрядов (точнее, логарифма от плотности плюс 1) приведен на рис. 2, а для 5 ч 16 июля в ТЦ Haitang. Центр прямоугольной системы координат находится в точке центра ТЦ на 12 ч 16 июля. Экстремумы поля дают положение кластеров с высокой частотой и плотностью разрядов, которые можно связывать с мезомасштабными конвективными комплексами. Их распределение показано на рис. 2, б, здесь же нанесены положения экстремумов поля плотности для 7 ч 16 июля. Такие расчеты со сдвигом по времени дают возможность оценивать скорости перемещения грозовых комплексов и тем самым давать оценку интенсивности тайфуна. По смещению экстремумов в центре определяется скорость тайфуна. В данном примере она равна 4,7 м/с, что очень близко к скорости перемещения 5 м/с, полученной по данным архивов Tropical Cyclone Best Track.

Известно, что наиболее мощные конвективные облака, пронизывающие всю тропосферу и пробивающие в некоторых случаях тропопаузу, наблюдаются в центральной области зрелых ТЦ и образуют так называемую облачную стену «глаза». Полоса разрядов вдоль траектории в тайфуне Sanba (№ 1216)

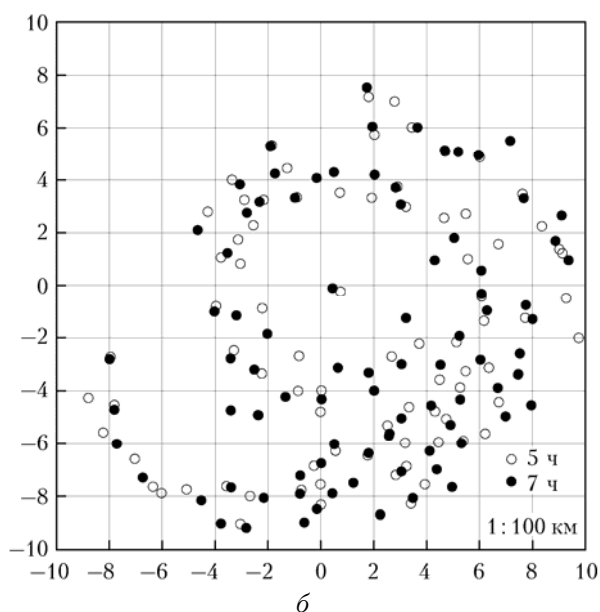
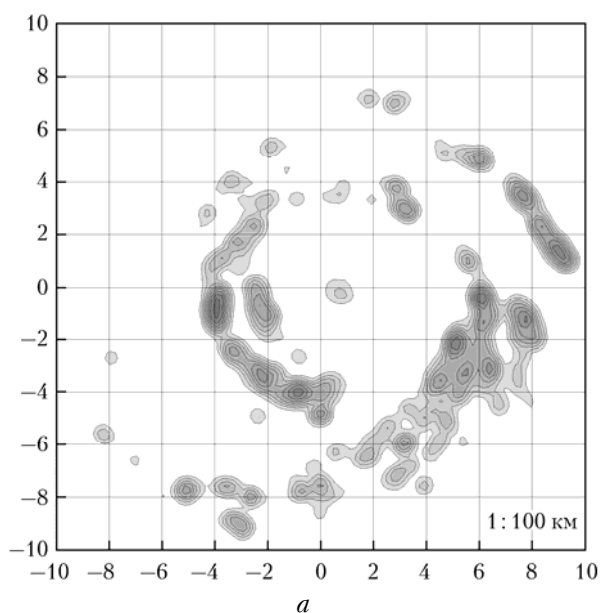


Рис. 2. Распределение молниевых разрядов в ТЦ Hai Tang 16 июля. Логарифм плотности молниевых разрядов в 5 ч (а) и их пространственное положение в 5 и 7 ч (б)

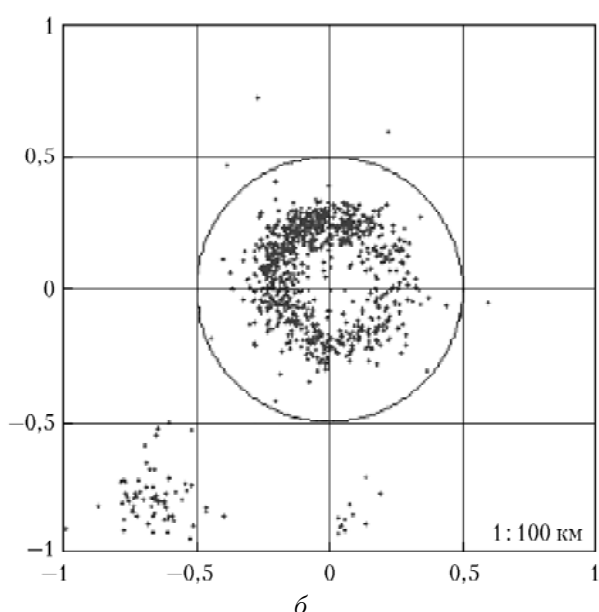
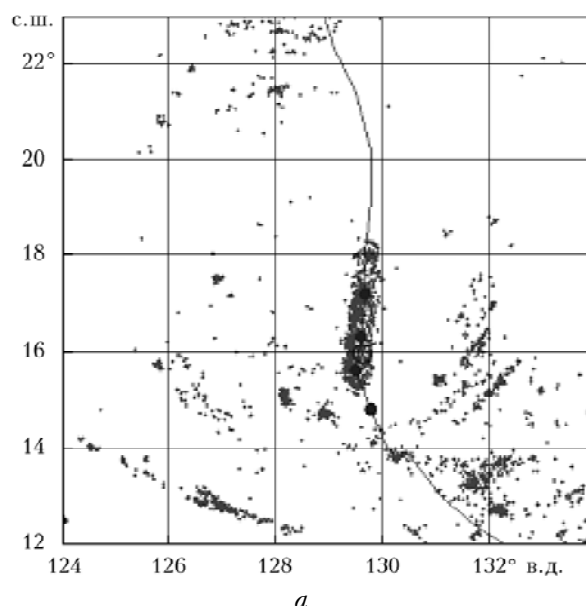


Рис. 3. Распределение молниевых разрядов в ТЦ Sanba в день максимального развития 13 сентября 2012 г. Минимальное давление в циклоне 900 мбар

13 сентября 2012 г. на рис. 3, а иллюстрирует эффект «размазки» при движении самого тайфуна, а суточная композиция в центральной области на рис. 3, б четко показывает кольцевую структуру, которую можно связать с наличием грозовых ячеек в облачной стене. По радиальному распределению разрядов можно оценить радиус его максимума и радиус внутренней точки перегиба этого распределения. Как нам представляется, первая оценка должна быть близка к радиусу максимального ветра ~ 25 км, а вторая дает оценку радиуса «глаза» как области с минимальной облачностью ~ 20 км. В архиве JTWC радиус максимального ветра в эти сутки составляет от 27 до 54 км со средним 38 км, а диаметр «глаза» — 18 км.

В работе [6] показано, что возникновению ТЦ предшествует скопление мезовихрей, выделяемых в поле приводного ветра. В принципе, такие скопления мезовихрей, если их связывать с конвективными комплексами, могут регистрироваться и по распределению грозовой активности. Такой мониторинг, в отличие от наблюдений за скоростью ветра со спутников, возможен непрерывно в течение суток. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты сопоставления полей приводного ветра, полученных скаттерометром QuikSCAT, вихря скорости ветра и распределения за сутки разрядов в ТЦ Sonca (№ 0503) 20 апреля 2005 г. за 16 ч до первого сообщения. Можно видеть, что есть определенное соответствие в положении

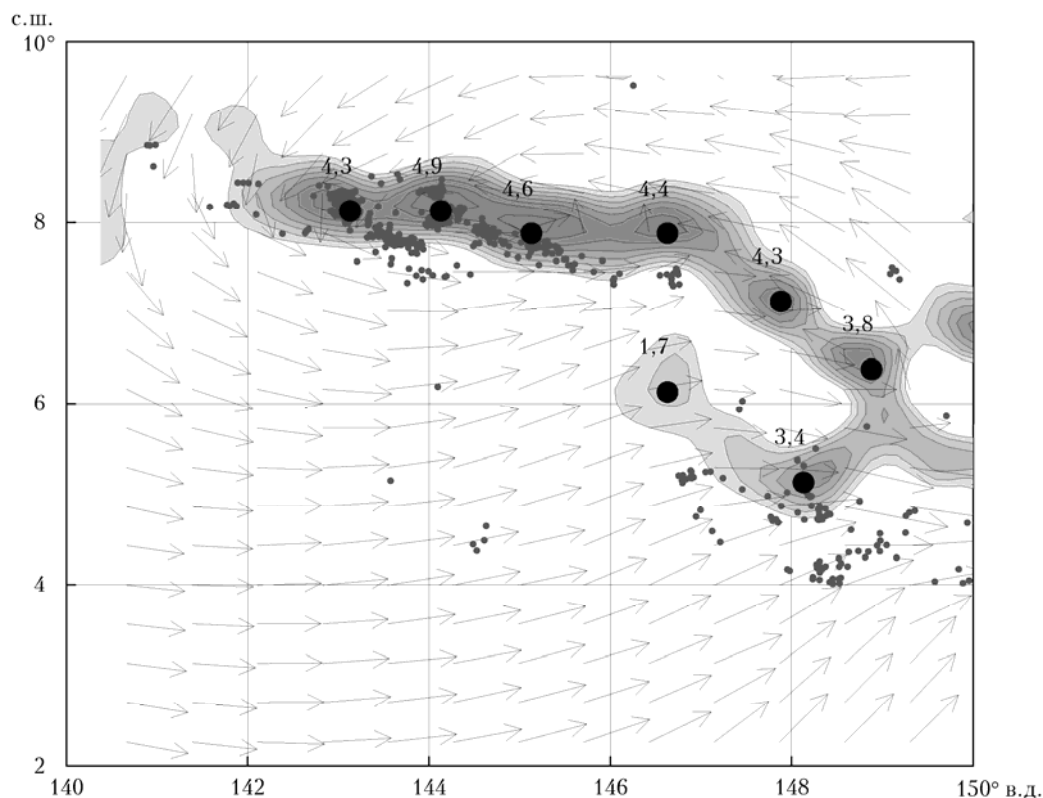


Рис. 4. Молниевые разряды и вихрь скорости ветра в районе зарождения ТЦ Sonca. Измерения скаттерометром 20 апреля 2005 г. около 08 ч UTC (примерно за 16 ч до первого сообщения). Серым цветом выделена область осадков по данным скаттерометра QuikSCAT. Единицы вихря скорости (экстремумы отмечены на рисунке) – $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$

мезовихрей и кластеров грозных разрядов. Анализ других полей приводного ветра, вихря скорости и полей грозных разрядов в других тайфунах на разных стадиях развития показывает, что структуры в поле грозной активности могут существенно отличаться от мезоструктуры в полях вихря приводного ветра. Возможно, это связано с низкой точностью оценок ветра и его направления по данным спутниковых скаттерометров и, как следствие, большими погрешностями в оценках поля вихря. Вопрос о соотношении структур, выделяемых в полях грозной активности и приводного ветра, требует дальнейшего изучения.

Заключение

На примере анализа полей молниевых разрядов в отдельных тропических циклонах в северо-западной части Тихого океана показаны возможности использования данных Всемирной сети локализации гроз WWLLN в мониторинге циклонических систем над океаном и морями. Продемонстрированы возможные подходы к обработке данных сети и к интерпретации результатов обработки с точки зрения наличия тех или иных метеорологических структурных элементов в распределениях молниевых разрядов. Расширение сети станций WWLLN в северо-западной части Тихого океана может сделать ее эффективным инструментом для непрерывного слежения за тро-

пических циклонами и основой для разработки новых методик их исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке ДВО РАН (программа фундаментальных исследований «Дальний Восток», проект «Развитие комплексных радиофизических методов исследования погодных и климатических систем») и Американского фонда гражданских исследований (RUG1-7084-PA-13).

1. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Vollaro D. The World Wide Lightning Location Network and Convective Activity in Tropical Cyclones // *Mon. Weather Rev.* 2011. V. 139, N 1. P. 175–191.
2. Leary L.A., Ritchie E.A. Lightning flash rates as an indicator of tropical cyclone genesis in the Eastern North Pacific // *Mon. Weather Rev.* 2009. V. 137, N 10. P. 3456–3470.
3. Squires K., Businger S. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136, N 5. P. 1706–1726.
4. Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2013. V. 94, N 9. D-12-00082. P. 1381–1391.
5. World Wide Lightning Location Network. URL: <http://wwlln.net>
6. Поталова Е.Ю., Пермяков М.С., Клещева Т.И. Мезомасштабная структура тропических циклонов в поле приводного ветра // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 11. С. 22–29.

7. *Japan* Meteorological Agency. URL: <http://www.jma.go.jp>
8. *Joint* Typhoon Warning Center. URL: <http://www.usno.navy.mil/JTWC/>
9. *Remote* Sensing Systems. URL: <http://www.remss.com>
10. *Gray W.M.* Hurricane: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation // *Roy. Met. Soc.* 1979. V. 105. P. 915–927.
11. *Digital* Typhoon: Images and Information. URL: <http://agora.ex.nii.ac.jp>

M.S. Permyakov, E.Yu. Potalova, B.M. Shevtsov, N.V. Cherneva, R.H. Holzworth. **Lightning activity and tropical cyclone structure.**

Synoptic and mesoscale weather systems over ocean and seas are often accompanied by lightning activity, which intensity and spatial distribution is modulated by the dynamic structure of these weather systems. Lightning discharges are the sources of electromagnetic radiation in very low frequency range (VLF) and are registered by VLF direction finders. Using the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) the relations of characteristics of lightning fields in the North-Western Pacific Ocean with the characteristics of the fields of meteorological elements of weather formations, estimated by remote sensing data from satellites, are study through examples of tropical cyclones. The technique is illustrated allowing binding parameters of thunderstorm activity (frequency and intensity, spatial distribution of lightning) with the structure of weather systems over the oceans and seas, the intensity and shape of mesoscale structures in these systems, allocated to the fields of the vortex drive wind scatterometers and satellite images in the visible and infrared bands. On the example of separate tropical cyclones (TC) for 2012–2013, the relation of lightning discharge frequency and density in the area of influence of a TC with spatial distribution of driving ocean wind vortex is shown.