

## Набор данных о ветре и волнении для изучения тропических циклонов

М. В. Юровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
✉ [mykosnik@gmail.com](mailto:mykosnik@gmail.com)

Поступила в редакцию 04.07.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022;  
принята к публикации 16.01.2023.

### Аннотация

**Цель.** Целью работы является систематизирование сведений о характеристиках поля ветра и высоте волн вдоль треков альтиметров в районе тропических циклонов, а также подробная визуализация этой информации, позволяющая оценить доступность данных и возможность их использования в конкретном циклоне для различных научных исследований.

**Методы и результаты.** Для формирования набора данных были использованы сведения из открытых источников о параметрах тропических циклонов (*Best Track Data*) в 2020–2022 гг. и измерения вдоль треков альтиметров, установленных на семи спутниках. Для каждого циклона, максимальная скорость ветра в котором превосходила 30 м/с, созданы файлы в форматах *NetCDF* и *MAT*, содержащие данные альтиметрии о значительной высоте волн и скорости ветра в районе циклона, информацию о траектории циклона и его основных характеристиках каждые 3 ч. Для описания радиального распределения скорости ветра предлагается аппроксимация стандартных данных о расстояниях от центра циклона до точек со скоростями ветра 34, 50 и 64 узла аналитической функцией Холланда. Для каждого циклона предоставлены графические файлы, иллюстрирующие эволюцию его основных параметров (радиус, максимальная скорость ветра, скорость смещения), качество аппроксимации радиального распределения скорости ветра, расположение треков альтиметров и значения высоты волн и скорости ветра вдоль каждого трека. Компьютерные программы, разработанные в среде *MATLAB*, позволяют пополнять созданный массив данных в автоматическом режиме. К моменту публикации настоящей работы набор данных был дополнен информацией о тропических циклонах и доступными измерениями альтиметрии за 1985–2018 гг.

**Выводы.** Создан структурированный массив данных, предоставляющий информацию о волнении и скорости ветра во всех интенсивных тропических циклонах за период 2020–2022 гг. Данные и иллюстрации к ним могут быть использованы при планировании и осуществлении тематических исследований, для валидации моделей эволюции тропических циклонов и волнения в них.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, набор данных, спутниковая альтиметрия, высота волн, скорость ветра, поле ветра, экстремальные условия

**Благодарности:** работа выполнена при основной поддержке гранта РФФ № 21-17-00236; информационно-вычислительные ресурсы предоставлены в рамках государственного задания FNNN-2021-0004. При формировании набора данных использовались архивы *NOAA* с данными о циклонах и *CMEMS* – с данными альтиметрии.

**Для цитирования:** Юровская М. В. Набор данных о ветре и волнении для изучения тропических циклонов // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 220–233. EDN GOFLKQ. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-220-233

## Dataset on Wind and Waves to Study Tropical Cyclones

M. V. Yurovskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

✉ [mvkosnik@gmail.com](mailto:mvkosnik@gmail.com)

### Abstract

**Purpose.** The aim of the paper is to systematize information on the characteristics of the wind field and the wave heights along the altimeter tracks in the region of tropical cyclones, as well as to visualize this information in details for assessing the data availability and applicability to a particular cyclone in order to use the obtained information for various scientific studies.

**Method and Results.** To form the database, the open source data were used including the tropical cyclone parameters (*Best Track Data*) in 2020–2022, and the along-track altimeter measurements performed from seven satellites. For each cyclone, in which the maximum wind speed exceeded 30 m/s, the files in the *NetCDF* and *MAT* formats were created; they contained altimetry data on the significant wave heights and wind speed in a cyclone area, information on the trajectory of each cyclone and its main characteristics renewed every 3 hours. To describe the radial distribution of wind speed, the standard data on the distances from a cyclone centre to the points where the wind speeds achieved 34, 50, and 64 knots, were proposed to be approximated using the Holland analytical function. Each cyclone is provided with the graphical files illustrating the evolution of its main parameters (radius, maximum wind speed, and translation velocity), the quality of approximation of the wind speed radial distribution, the location of altimeter tracks, and the along-track values of wave heights and wind speed. The developed *MATLAB* computer programs allow automatic updating the created data array. By the time of paper publication, the dataset had been supplemented with the information on the tropical cyclones and the available altimetry measurements for 1985–2018.

**Conclusions.** The structured dataset has been created to provide the information on waves and wind speed of all the intense tropical cyclones for the period from 2020 to 2022. The data and the corresponding illustrations can be used for planning and implementing the case studies, and for validating the models of tropical cyclones formation and wave development under their action.

**Keywords:** tropical cyclones, dataset, satellite altimetry, wave height, wind speed, wind field, extreme conditions

**Acknowledgements:** The study was carried out with the basic support provided by the Russian Science Foundation grant No. 21-17-00236; the information and computing resources were provided within the framework of state assignment FNNN-2021-0004. The database was formed using the *NOAA* (data on cyclones) and *CMEMS* (altimetry data) archives.

**For citation:** Yurovskaya, M.V., 2023. Dataset on Wind and Waves to Study Tropical Cyclones. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 202-214. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-202-214

### Введение

Тропические циклоны (ТЦ), формирующиеся в районе экватора (между 10-м и 30-м градусами широты обоих полушарий), часто причиняют тяжелый экономический ущерб и приводят к гибели людей в десятках стран не только тропических районов, но и более высоких широт. Ежегодно образуется до сотни ТЦ в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах. Большинство из них формируются в Северном полушарии и распространяются на сотни и тысячи километров в течение нескольких недель. Влияние тайфунов, зарождающихся в северо-западной части Тихого океана, ощущается и на российских территориях – в акваториях и на берегах Дальнего Востока [1–3]. Помимо разрушений,

вызываемых сильными ветрами, и затоплений, связанных с осадками, в районах ТЦ могут генерироваться аномально высокие волны, представляющие опасность для морской навигации и прибрежной инфраструктуры.

Подробная информация о частоте и интенсивности ТЦ, характеристиках ветра и волнения в них необходима для прогнозирования и предотвращения создаваемых циклонами социальных и экономических рисков. Кроме того, эти характеристики представляют фундаментальный и практический интерес для исследования механизмов формирования экстремальных погодных систем, развития атмосферных и волновых моделей [4, 5]. Наблюдения за межгодовой изменчивостью активности ТЦ позволяют установить закономерности, связанные с глобальным изменением климата [6].

До конца прошлого столетия не существовало автоматизированных систем регистрации и прогноза ТЦ. Первая такая система, *Automated Tropical Cyclone Forecasting System (ATCF)* – Автоматизированная система прогнозирования тропических циклонов [7], была создана в 1988 г. и до сих пор используется Объединенным центром предупреждения о тайфунах (*JTWC*). В течение последующих десятилетий подобные системы прогнозирования были разработаны и другими агентствами по предупреждению о тропических циклонах, например Австралийским бюро метеорологии, Метеорологическим департаментом Индии, Японским метеорологическим агентством, Управлением метеорологии Китая и др.

Несмотря на большое количество параметров, необходимых для получения детального представления о ТЦ, данные о циклонах во всем мире в основном содержат только оценки их координат и интенсивности и лишь в некоторых базах – оценки радиального и азимутального распределения скорости ветра. Информация о положении и интенсивности ТЦ, как правило, уточняется после окончания сезона в результате повторного анализа по всем имеющимся данным корабельных, надводных и спутниковых наблюдений. С прогрессом технологий наблюдательных систем и развитием методов интерпретации спутниковых измерений становится доступным включение дополнительной информации о ветре, волнах и осадках в существующие массивы данных [8, 9]. Совместное использование данных из разных источников позволяет эффективно составлять статистические модели прогнозирования интенсивности ТЦ и решать ряд научных задач, таких как моделирование и прогноз ветрового волнения и зыби [10], оценка глобальных изменений количества экстремальных осадков [11] и др. Такие исследования зависят от полноты глобального набора данных о ТЦ.

Целью настоящей работы является систематизация данных альтиметрии в приложении к исследованию ТЦ. Для этого были совместно проанализированы открытые архивы сведений о перемещении, интенсивности ТЦ, пространственном распределении ветра в них и альтиметрические измерения высоты волн и скорости ветра, начиная с 2020 г. Особое внимание уделяется наглядности формируемого набора данных: для каждого случая предлагаются иллюстрации, позволяющие оценить эволюцию характеристик ТЦ и поля волнения, количество треков альтиметра в интересующей области и другие параметры. Использование структурированного массива данных и соответствующей

щих рисунков может быть полезным при поиске случаев для различных тематических исследований, получения вспомогательной наглядной информации о ветре и волнах в уже исследуемых ТЦ, для валидации моделей развития волн и эволюции циклонов.

### Основные характеристики ТЦ

**Поле ветра.** Данные о траекториях и интенсивности циклонов были взяты из архива *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)*<sup>1</sup>, предоставленного Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA). Данный архив является продуктом глобального скоординированного сотрудничества различных климатических агентств, первым публично доступным централизованным хранилищем, в котором объединяются и приводятся к единому виду разрозненные данные о ТЦ в бассейнах Тихого, Атлантического и Индийского океанов с учетом внутренней специфики и различий между международными агентствами [12]. Данные охватывают период с 1842 г. по настоящее время с интерполяцией на трехчасовые интервалы. Основными предоставляемыми параметрами являются положение и интенсивность ТЦ (максимальная устойчивая скорость ветра или минимальное центральное давление). В архив также включены дополнительные данные, документируемые некоторыми агентствами: радиус максимального ветра, давление окружающей среды, радиус ветра ураганной силы и т. д.

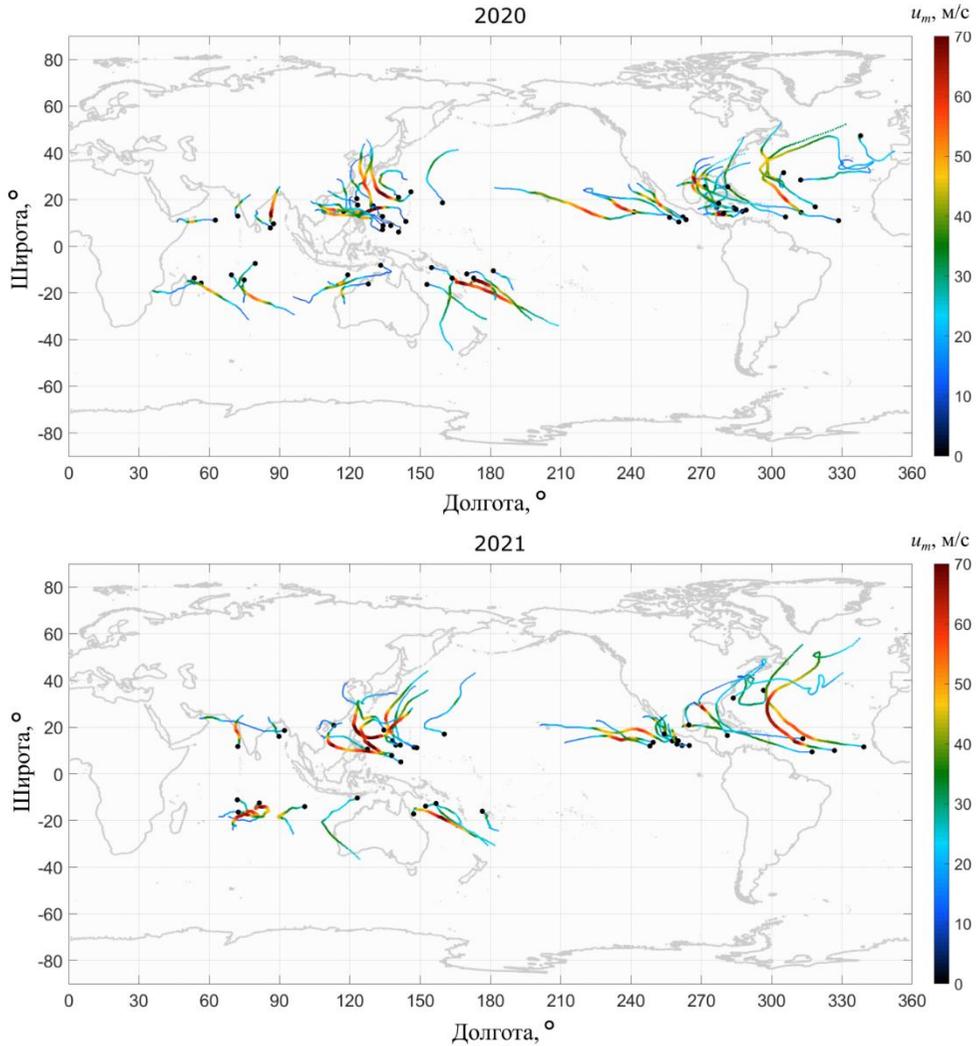
В настоящей работе собрана информация о наиболее интенсивных циклонах, для которых, помимо сведений о характеристиках ТЦ, доступен архив альтиметрических измерений с рассматриваемых спутников (*SARAL/AltiKa, CryoSat-2, CFOSAT, HY-2B, Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B*). В массив данных включены все ТЦ, начиная с 2020 г., максимальная скорость ветра в которых превышала 30 м/с. Ежегодно образуется до 50 таких ТЦ, их траектории за период 2020–2021 гг. показаны на рис. 1, где цвет обозначает максимальную скорость ветра в ТЦ на данном участке траектории. Здесь и далее долгота приведена в диапазоне 0–360°, где значения больше 180° соответствуют Западному полушарию.

Помимо максимальной скорости ветра, радиуса максимальных ветров, координат и рассчитываемых из них скорости и направления ТЦ в формируемый архив включены стандартные характеристики радиального распределения скорости ветра – расстояния от центра ТЦ до точек со значениями скорости ветра 34, 50 и 64 узла (в некоторых случаях также доступны радиусы для скорости ветра 30 узлов). Поскольку для практических задач часто требуется информация о полном профиле скорости ветра, для каждого момента времени предлагается аппроксимация ее известных значений осесимметричной функцией Холланда [13]:

$$u(r) = \sqrt{(u_m^2 + u_m R_m f) \left(\frac{R_m}{r}\right)^B \exp\left(1 - \frac{R_m^B}{r^B}\right) + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4 / K. R. Knapp // NOAA National Centers for Environmental Information. 2018. doi:10.25921/82ty-9e16  
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 2 2023 223

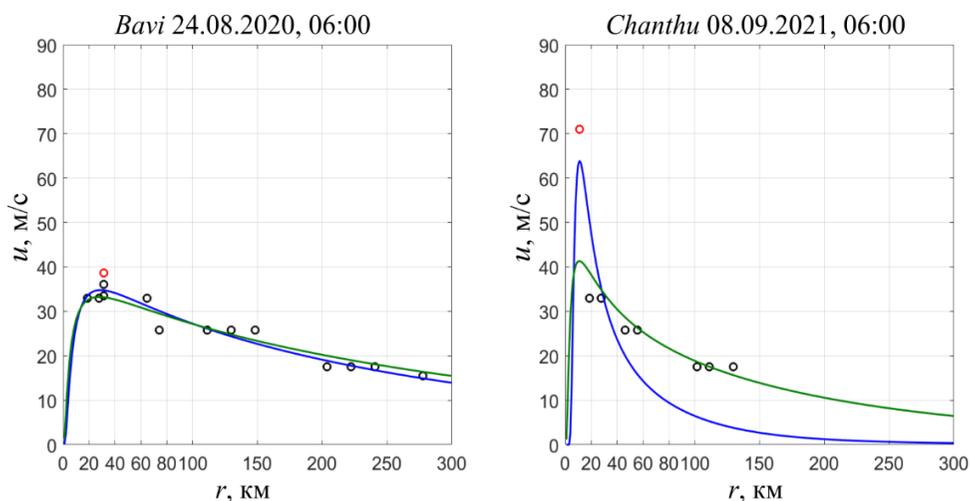
где  $u$  – скорость ветра на расстоянии  $r$  от центра циклона;  $u_m$  – максимальная скорость ветра;  $R_m$  – радиус максимальных ветров;  $f$  – параметр Кориолиса;  $B$  – параметр ширины профиля скорости ветра.



**Р и с. 1.** Траектории наиболее интенсивных тропических циклонов в 2020 (вверху) и 2021 (внизу) годах (черными кружочками обозначены точки старта ТЦ)  
**F i g. 1.** Trajectories of the most intense tropical cyclones in 2020 (top) and 2021 (bottom) (black circles denote the TC start points)

Аппроксимация (1) не всегда позволяет описать поле ветра одновременно в ближней и дальней зоне ТЦ. Для корректного воспроизведения профиля на всех участках предлагается отдельно рассматривать центр и периферию ТЦ, используя кривую с весом  $1/r$  для ближней зоны и кривую с весом  $r$  для пери-

ферии. При этом для ближней зоны поиск оптимального значения  $u_m$  в выражении (1) ограничивается пределами (0,9–1) от значения скорости максимальных ветров в базе *Best Track Data (BTD)*, а в дальней зоне – пределами (0,3–1). В обоих случаях  $R_m$  фиксируется на значении радиуса скорости максимальных ветров по *BTD*. Примеры восстановленных распределений скорости ветра приведены на рис. 2. Моделью полного профиля может служить огибающая полученных линий.



**Р и с. 2.** Примеры аппроксимации данных о скорости ветра (черные кружочки) функцией Холланда (1) в ТЦ *Bavi* и *Chanthu* (синяя линия – ближняя зона ТЦ, зеленая – их периферия; красные кружочки – радиус и скорость максимальных ветров по *Best Track Data*)

**Fig. 2.** Examples of approximating the data on wind speed (black circles) in the TC *Bavi* and *Chanthu* by the Holland function (1) (blue line denotes the TC near zone, green one – the TC periphery; red circles are the radius and the maximum wind speed based on the *Best Track Data*)

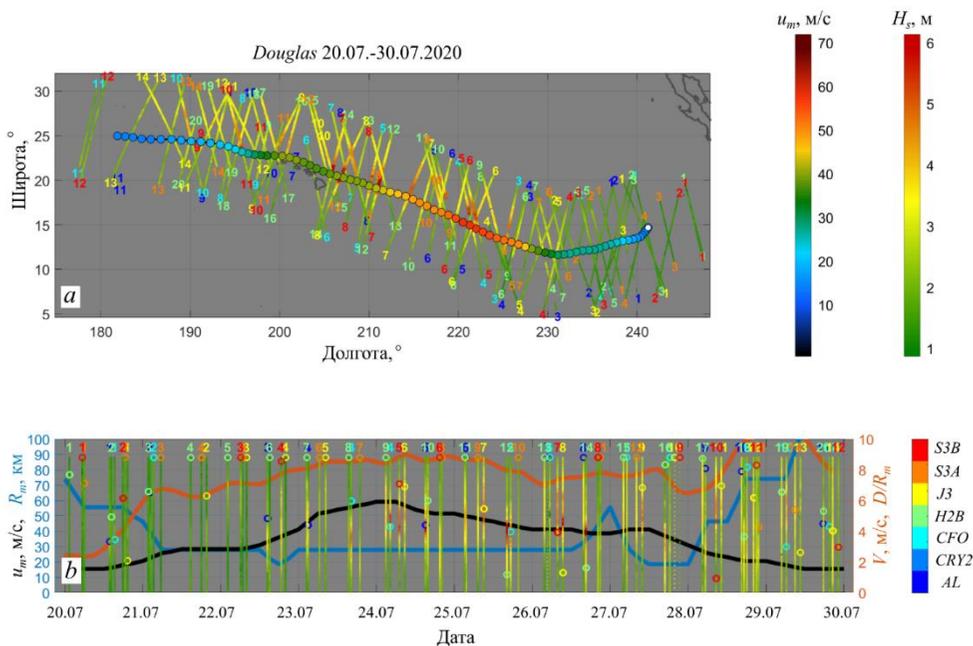
Отметим, что при аппроксимации функцией (1) данные о скорости ветра в разных квадрантах циклона учитываются с равными весами. Разброс точек позволяет судить о степени асимметрии двумерного распределения скорости ветра. Предлагаемые функции являются одним из вариантов описания этого распределения в предположении, что оно однородно по азимуту. Поскольку архив содержит исходные данные с указанием квадранта, пользователю доступно проведение собственных оценок двумерного распределения поля ветра. В этом случае приведенные иллюстрации, аналогичные рис. 2, могут служить ориентиром.

**Высота волн и скорость ветра по данным альтиметрии.** Данные о значительной высоте волн и скорости ветра вдоль треков альтиметров, установленных на семи указанных выше спутниках, были взяты из открытых архивов сервиса мониторинга морской среды *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)*, <https://resources.marine.copernicus.eu/products>, предоставляющего бесплатную регулярную и систематизированную справоч-

ную информацию о состоянии и изменчивости океана. В используемом продукте (*Level 3*) данные альтиметрических измерений приведены к общему формату после тщательного редактирования, сочетающего различные критерии (пороговые значения параметров, флаги качества, флаги наличия льда и др.), и применения фильтров для уменьшения шума измерения.

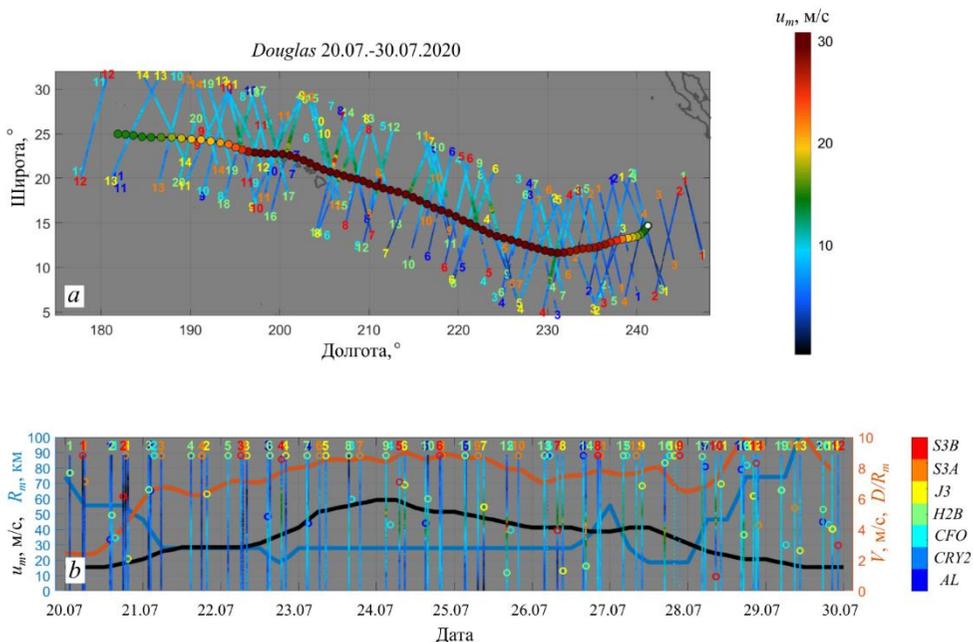
При отборе участков альтиметрических треков для базы циклонов использовался критерий  $\sqrt{(lat - lat_0)^2 + (lon - lon_0)^2} < 7^\circ$ , где  $(lat, lon)$  – координаты альтиметрических измерений;  $(lat_0, lon_0)$  – положение ТЦ в момент пролета спутника.

Для иллюстрации эволюции во времени параметров ТЦ (координаты, скорость и направление движения, максимальная скорость ветра, радиус максимальной скорости ветра), количества доступных измерений альтиметров, пространственной и временной изменчивости высоты волн в районе ТЦ для каждого случая были построены рисунки, наглядно объединяющие все перечисленные характеристики. На рис. 3 цветом показаны максимальная скорость ветра в ТЦ и высота волн по данным альтиметрии; цифры обозначают порядковый номер трека альтиметра, соответствующий нумерации в *MAT/NetCDF*-файле для данного ТЦ, цвет цифры – название спутника; кружочками на нижнем рисунке обозначены минимальные расстояния  $D$  до центра ТЦ для каждого трека, выраженные в радиусах максимальных ветров в ТЦ, при этом (в силу ограниченности оси ординат)  $D/R_m = 9$  соответствует  $D/R_m \geq 9$ .



**Р и с. 3.** Характеристики тропического циклона *Douglas*: *a* – траектория ТЦ и пересекающие ее треки альтиметров (белый кружочек – точка начала ТЦ); *b* – эволюция во времени параметров ТЦ  
**Fig. 3.** Characteristics of TC *Douglas*: *a* – the TC trajectory and the crossing it altimeter tracks (white circle is the TC start point); *b* – time evolution of the TC parameters

Аналогичные рисунки были построены для измеренной альтиметрами скорости ветра (рис. 4). Отметим, что вблизи центра ТЦ, в области наиболее сильных ветров, оценки скорости ветра могут быть заниженными, поскольку стандартные алгоритмы, применяемые в альтиметрии, считаются надежными лишь при скоростях ветра до 20–30 м/с [14, 15]. Кроме того, на сигнал радара влияют интенсивные осадки, характерные для ТЦ, в связи с чем часть данных о скорости ветра и высоте волн в районе центра ТЦ отфильтровывается.



**Рис. 4.** То же, что на рис. 3, для скорости ветра, измеренной вдоль треков альтиметров  
**Fig. 4.** The same as in Fig. 3, but for the wind speed measured along the altimeter tracks

### Структура архива

Массив данных о циклонах, включающий файлы с данными и иллюстрациями к ним, может быть сформирован автоматически при наличии текущей версии файла с информацией о траекториях и интенсивности циклонов из архива *IBTrACS* и доступа к *FTP*-серверу *Copernicus*. Для этого последовательно запускаются два блока программ, разработанных в среде *MATLAB*:

1. Анализ файла *IBTrACS\*.nc*: выбор наиболее интенсивных ТЦ, отвечающих критерию  $u_m > 30$  м/с; создание *MAT*-файлов с данными о координатах, времени, скорости и направлении движения ТЦ, максимальной скорости ветра, радиусе максимальных ветров, скорости ветра на других радиусах; аппроксимация радиального профиля ветра функцией (1) и сохранение рисунков, иллюстрирующих качество аппроксимации (см. рис. 2);

2. Анализ данных альтиметрии через *FTP*-сервер *CMEMS*: определение участков треков, находящихся на расстоянии до  $7^\circ$  от центра каждого ТЦ; построение рисунков (см. рис. 3, 4); создание файлов, объединяющих информацию о характеристиках ТЦ и данные альтиметрии.

Для удобства пользователей файлы, указанные в блоке 2, предоставляются в двух форматах: *MAT* (для среды *MATLAB*) и в машиннонезависимом двоичном формате *NetCDF*; *MAT*-файлы включают структуру *BTD* с полями, содержащими данные о характеристиках ТЦ, и аналогичные друг другу структуры *AL*, *CFO*, *CRY2*, *H2B*, *J3*, *S3A*, *S3B* с информацией об измерениях альтиметров *SARAL/AltiKa*, *CFOSAT*, *CryoSat-2*, *HY-2B*, *Jason-3*, *Sentinel-3A*, *Sentinel-3B* соответственно. Более подробная информация о переменных, содержащихся в *MAT*- и *NetCDF*-файлах, представлена ниже.

#### Параметры ТЦ (структура *BTD*)

<i>ax</i> .....	Границы области распространения, °
<i>t</i> .....	Время, дни от 01.01.01. 00:00:00
<i>lon</i> .....	Долгота, °
<i>lat</i> .....	Широта, °
<i>VMAX</i> .....	Максимальная скорость ветра, м/с
<i>RMW</i> .....	Радиус максимальных ветров, км
<i>V</i> .....	Скорость движения, м/с
<i>DIR</i> .....	Направление движения, ° (против часовой стрелки от оси, направленной на восток)
<i>U</i> .....	Скорость ветра на расстояниях <i>R</i> от центра ТЦ, м/с
<i>R</i> .....	Расстояния от центра ТЦ до точек со скоростью ветра <i>U</i> , км
<i>Q</i> .....	Номер квадранта для точек радиального профиля ветра <i>U(R)</i> (1 – СВ, 2 – ЮВ, 3 – ЮЗ, 4 – СЗ)
<i>Holland_Rm</i> .....	$R_m$ в аппроксимации (1) в ближней зоне, км
<i>Holland_um</i> .....	$u_m$ в аппроксимации (1) в ближней зоне, м/с
<i>Holland_B</i> .....	$B$ в аппроксимации (1) в ближней зоне
<i>Holland_far_Rm</i> .....	$R_m$ в аппроксимации (1) на периферии, км
<i>Holland_far_um</i> .....	$u_m$ в аппроксимации (1) на периферии, м/с
<i>Holland_far_B</i> .....	$B$ в аппроксимации (1) на периферии

#### Данные альтиметрии (структуры *AL*, *CFO*, *CRY2*, *H2B*, *J3*, *S3A*, *S3B*)

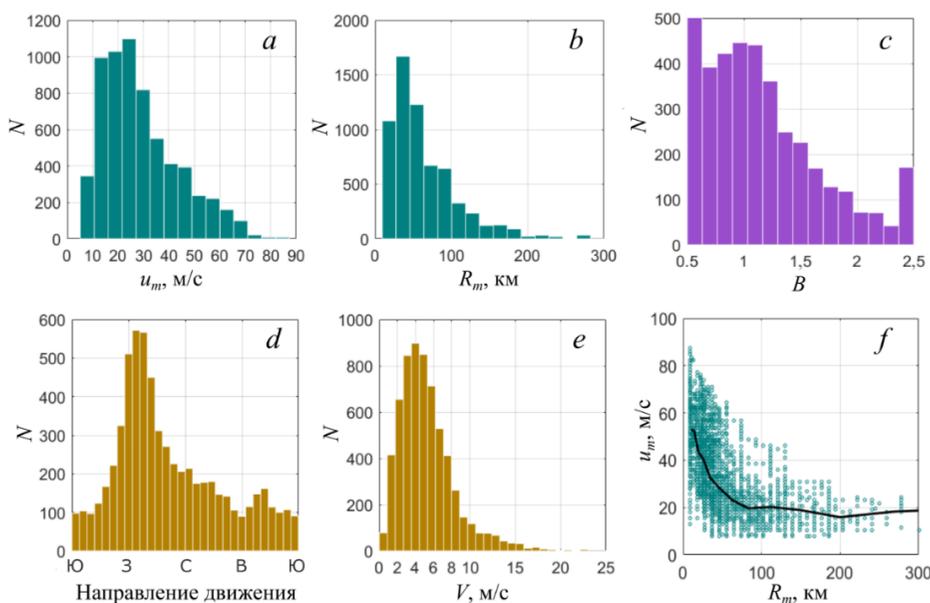
<i>numb</i> .....	Количество треков альтиметра, пересекающих зону ТЦ
<i>time_i</i> .....	Время <i>i</i> -го наблюдения, дни от 01.01.01. 00:00:00
<i>hs_i</i> .....	Значительная высота волн, м
<i>wind_i</i> .....	Скорость ветра, м/с
<i>lon_i</i> .....	Долгота, °
<i>lat_i</i> .....	Широта, °
<i>TC_lon_i</i> .....	Долгота циклона, °
<i>TC_lat_i</i> .....	Широта циклона, °

#### **Примеры применения набора данных**

Созданный набор данных может применяться для широкого круга задач. Так, данные о характеристиках ТЦ *Goni* и альтиметрические измерения в нем

совместно анализировались в работе [10], где были продемонстрированы возможности использования спутниковых данных различного типа и численного моделирования для прогноза волн, формирующихся в ТЦ. В работе [16] созданный архив использовался для валидации автомодельных функций, предсказывающих поля волнения в ТЦ по его радиусу, максимальной скорости ветра, скорости смещения и параметру Холланда  $B$ .

Характеристики ветра, волнения и кинематические свойства ТЦ можно исследовать независимо и/или определять их взаимосвязь. Статистические распределения (гистограммы по всему набору данных) максимальной скорости ветра в ТЦ показаны на рис. 5, *a*, радиуса максимального ветра – на рис. 5, *b*, параметра  $B$  при аппроксимации профиля ветра выражением (1) – на рис. 5, *c*, направления и скорости движения ТЦ – на рис. 5, *d, e*. На рис. 5, *f* максимальная скорость ветра в ТЦ приведена в зависимости от его радиуса. Из приведенных графиков можно, в частности, заключить, что большинство наблюдаемых ТЦ движется на запад (рис. 5, *d*) со скоростями  $\sim 5$  м/с; циклоны с более интенсивными ветрами, как правило, имеют меньший радиус (рис. 5, *f*), а типичная форма профиля ветра соответствует значениям  $B$ , примерно равным 1. Отметим, что пики повторяемости, соответствующие левому и правому столбцам гистограммы для параметра  $B$ , связаны с ограничением значений  $B$  при аппроксимации профиля ветра формулой (1) в пределах 0,5–2,5: все случаи, где профиль ветра шире/уже, чем при этих пограничных значениях  $B$ , попадают в крайние столбцы распределения.



**Р и с. 5.** Гистограммы распределения характеристик ТЦ (*a – e*) и связь максимальной скорости ветра с радиусом ТЦ (*f*) (черная линия – скользящее среднее)

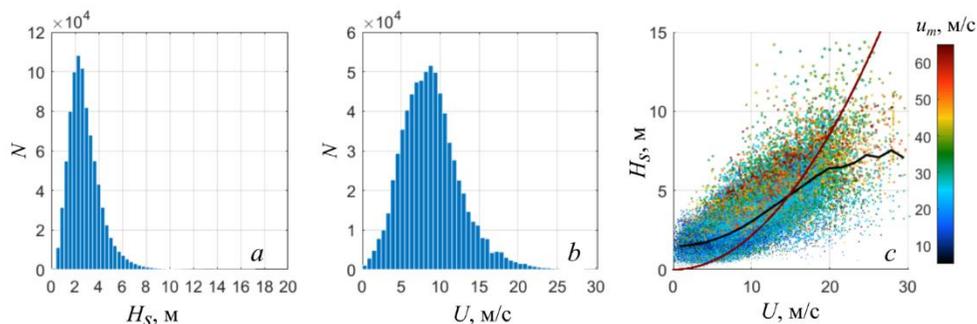
**F i g. 5.** Histograms of the TC characteristics' distribution (*a – e*) and relationship between the maximum wind speed and the TC radius (*f*) (black line is the bin average)

Наибольший интерес может представлять совместный анализ данных о ветре и волнении. Гистограммы распределения измеренных альтиметрами

значительной высоты волн и скорости ветра показаны на рис. 6, *a*, *b*. Напомним, что альтиметрические наблюдения скорости ветра ограничены значениями до 20–30 м/с, поэтому использование этих данных возможно лишь на периферии ТЦ. Прямое сопоставление измеренных скорости ветра и высоты волн дает значительный разброс данных (рис. 6, *c*), свидетельствующий о наличии других факторов, помимо локальной скорости ветра, влияющих на высоту волн в районе циклонов. Так, даже при слабых ветрах вдали от центра ТЦ, где данные альтиметрии о скорости ветра надежны, высота волн значительно превышает верхнюю оценку, соответствующую полностью развитому волнению [17]:

$$H=0,21U^2/g \quad (2)$$

( $g$  – ускорение свободного падения), что, по-видимому, связано с наличием зыби, формируемой в области максимальных ветров. Наблюдается ожидаемая тенденция: чем больше максимальная скорость ветра в ТЦ, тем больше измеренная высота волн при одной и той же локальной скорости ветра.

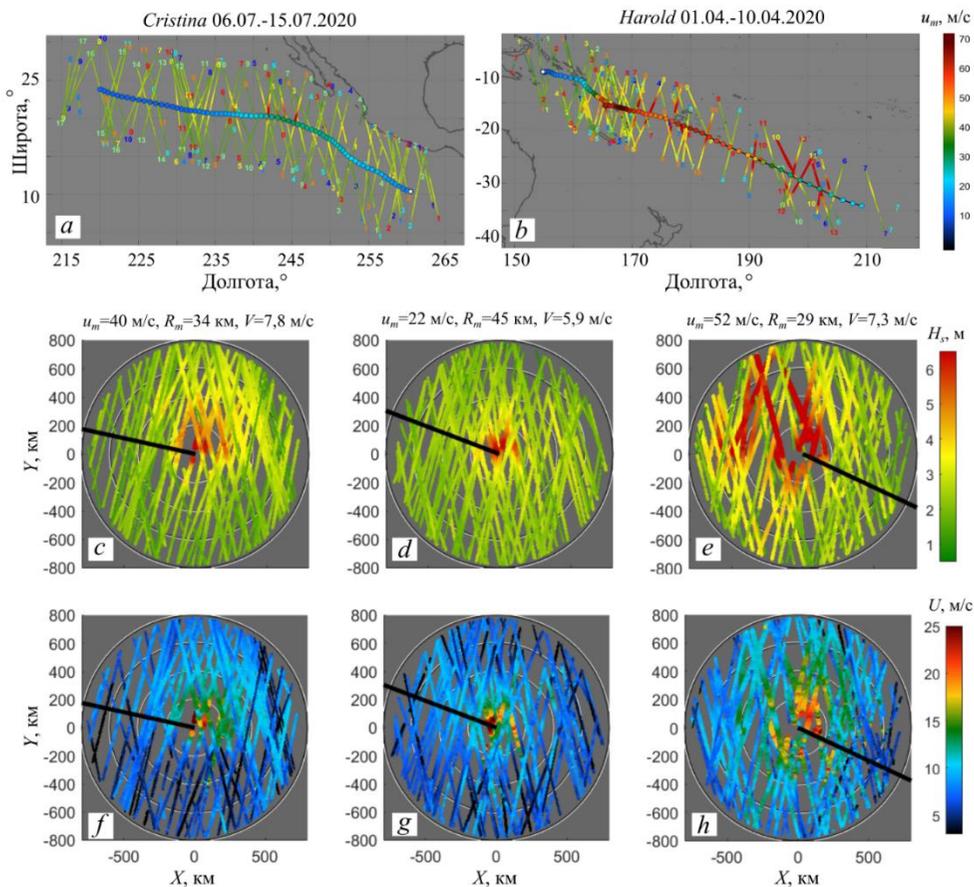


**Р и с. 6.** Гистограммы распределения значительной высоты волн (*a*) и скорости ветра (*b*) по данным альтиметрии; связь высоты волн и скорости ветра (*c*) (черная линия – скользящее среднее, красная – оценка по выражению (2) высоты полностью развитых волн)

**F i g. 6.** Histograms of distribution of the waves' significant heights (*a*) and the wind speed (*b*) based on the altimetry data; relation between the wave heights and the wind speed (*c*) (black line is the bin average, red one – the heights of the completely developed waves estimated by expression (2))

Совокупность альтиметрических измерений на протяжении времени существования ТЦ позволяет оценивать пространственные распределения высоты волн и скорости ветра в нем на участках траектории, где параметры ТЦ оставались достаточно стабильными. Примеры таких распределений приведены на рис. 7 для циклонов *Douglas* (траектория изображена на рис. 3), *Cristina* (рис. 7, *a*) и *Harold* (рис. 7, *b*). На рис. 7, *c* – *e* указаны средние по траектории (с весом  $\sim u_m$ ) значения максимальной скорости ветра в ТЦ, его радиуса и скорости смещения. Полученные распределения подтверждают известный эффект интенсификации энергии в правой (левой в Южном полушарии, рис. 7, *e*) части ТЦ относительно его направления движения. Этот эффект связан не только с асимметрией поля ветра (рис. 7, *f* – *h*), но в большей степени с так называемым захватом волн циклоном (резонанс групповой скорости и скоро-

сти движения ТЦ [18–20], когда волны, развивающиеся в направлении движения ТЦ, дольше остаются в области максимальных ветров, чем в левой (правой в Южном полушарии) части ТЦ, достигая большей степени развития.



**Р и с. 7.** Траектории ТЦ *Cristina* (a) и *Harold* (b); значительная высота волн (c – e) и скорость ветра (f – h) в районе ТЦ *Douglas*, *Cristina* и *Harold* соответственно (черные прямые – среднее направление движения ТЦ)

**F i g. 7.** Trajectories of TC *Cristina* (a) and *Harold* (b); the wave significant heights (c – e) and the wind speed (f – h) in the area of TC *Douglas*, *Cristina* and *Harold*, respectively (black lines denote mean movement direction of each TC)

### З а к л ю ч е н и е

На основе открытых данных о характеристиках ТЦ и альтиметрических наблюдений значительной высоты волн и скорости ветра создан систематизированный массив данных, обобщающий информацию о ветре и волнении в районах ТЦ в период 2020–2022 гг. Для каждого ТЦ построены рисунки, иллюстрирующие эволюцию параметров циклона, распределения высоты волн и скорости ветра. К моменту публикации настоящей работы архив был расширен: включены данные о ветре и волнении в ТЦ за период 1985–2018 гг. Более подробную информацию об этих данных можно найти в описании архива на сайте zenodo.org.

Архив может быть использован при выполнении тематических исследований, интерпретации спутниковых наблюдений океана и валидации различных волновых, атмосферных и климатических моделей. Все материалы находятся в открытом доступе (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7746159>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности образования следов циклонов (колебаний температуры воды) в районе мыса Свободного, юго-восточная часть острова Сахалин / П. Д. Ковалев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 1. С. 34–52. doi:10.22449/0233-7584-2022-1-34-52
2. Трансформация тайфуна в умеренных широтах как фактор катастрофического наводнения в Приморье осенью 2016 г. / Е. К. Семенов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 104–113.
3. Дубина В. А., Шамов Б. Б., Плотников В. В. Катастрофическое наводнение в Приморье в августе 2018 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 5. С. 253–256. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256
4. Tropical Cyclone Characteristics Represented by the Ocean Wave-Coupled Atmospheric Global Climate Model Incorporating Wave-Dependent Momentum Flux / T. Shimura [et al.] // Journal of Climate. 2022. Vol. 35, iss. 2. P. 499–515. doi:10.1175/JCLI-D-21-0362.1
5. Altimeter Observations of Tropical Cyclone-Generated Sea States: Spatial Analysis and Operational Hindcast Evaluation / C. Collins [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 5. 690. <https://doi.org/10.3390/jmse10050690>
6. A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends / J. P. Kossin [et al.] // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, iss. 4. L04815. doi:10.1029/2006GL028836
7. The Automated Tropical Cyclone Forecasting System (ATCF) / R. J. Miller [et al.] // Weather and Forecasting. 1990. Vol. 5, iss. 4. P. 653–660. doi:10.1175/1520-0434(1990)005<0653:TATCFS>2.0.CO;2
8. Combined Co- and Cross-Polarized SAR Measurements Under Extreme Wind Conditions / A. A. Mouche [et al.] // IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol. 55, iss. 12. P. 6746–6755. doi:10.1109/TGRS.2017.2732508
9. A revised L-band Radio-brightness sensitivity to extreme winds under Tropical Cyclone: the 5 year SMOS-storm database / N. Reul [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 180. P. 274–291. doi: 10.1016/j.rse.2016.03.011
10. Surface Wave Developments under Tropical Cyclone Goni (2020): Multi-Satellite Observations and Parametric Model Comparisons / M. Yurovskaya [et al.] // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 9. 2032. <https://doi.org/10.3390/rs14092032>
11. Lau K. M., Zhou Y. P., Wu H. T. Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. Vol. 113, iss. D23. D23113. doi:10.1029/2008JD009963
12. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying Tropical Cyclone Data / K. R. Knapp [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91, iss. 3. P. 363–376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
13. Holland G. J. An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes // Monthly Weather Review. 1980. Vol. 108, iss. 8. P. 1212–1218. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2
14. Zieger S., Vinoth J., Young I. R. Joint Calibration of Multiplatform Altimeter Measurements of Wind Speed and Wave Height over the Past 20 Years // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. Vol. 26, iss. 12. P. 2549–2564. doi:10.1175/2009JTECH1303.1

15. Estimating Gale to Hurricane Force Winds Using the Satellite Altimeter / Y. Quilfen [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2011. Vol. 28, iss. 4. P. 453–458. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05000.1>
16. *Yurovskaya M., Kudryavtsev V., Chapron B.* A self-similar description of the wave fields generated by tropical cyclones // Ocean Modelling. 2023. Vol. 183. 102184. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102184>
17. *Pierson W. J. Jr., Moskowitz L.* A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii // Journal of Geophysical Research. 1964. Vol. 69, iss. 24. P. 5181–5190. doi:10.1029/JZ069i024p05181
18. *Bowyer P. J., MacAfee A.W.* The Theory of Trapped-Fetch Waves with Tropical Cyclones – An Operational Perspective // Weather and Forecasting. 2005. Vol. 20, iss. 3. P. 229–244. <https://doi.org/10.1175/WAF849.1>
19. *Young I. R.* Parametric Hurricane Wave Prediction Model // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1988. Vol. 114, iss. 5. P. 637–652. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1988\)114:5\(637\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1988)114:5(637))
20. *Kudryavtsev V., Golubkin P., Chapron B.* A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. Vol. 120, iss. 11. P. 7538–7558. <https://doi.org/10.1002/2015JC011284>

*Об авторе:*

**Юровская Мария Владимировна**, старший научный сотрудник, лаборатория прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2); научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6607-4641**, **ResearchID: F-8957-2014**, [mvkosnik@gmail.com](mailto:mvkosnik@gmail.com)