

УДК 551.465

© А. В. Бухановский¹, Л. И. Лопатухин^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

²Санкт-Петербургский государственный университет

l.lopatuhin@spbu.ru

СТАТИСТИКА ШТОРМОВ НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ (АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД)

Классический (эйлеровский) подход к статистике штормов, применявшийся ранее, использовал анализ временных рядов параметров волн в отдельных точках (районах) акватории и позволял оценить пространственную структуру штормов только косвенными методами. Современный (лагранжев) подход к расчету волнового климата (режима волнения) включает формирование базы данных путем расчетов по численным гидродинамическим моделям динамики океана. Расчеты выполняются с дискретностью 3—6 ч за непрерывный период 30 и более лет. Таким образом, формируется многолетняя последовательность полей волнения расчетной акватории. Наличие информации о волнении одновременно на всей акватории бассейна позволяет проследить движение шторма во времени и по пространству. В результате, появилась возможность оценивать как параметры штормов, так и их траекторий, т.е. существенно расширить набор статистик, характеризующих штормовую активность на морях и океанах. На примере статистики параметров штормов и их траекторий для открытой штурмам Северной Атлантики и замкнутого Черного моря, показана специфика пространственно-временной изменчивости разнообразных акватории Мирового океана и выявлены различия в волновом климате. Полученные данные полезны для обеспечения безопасности мореплавания на обширных акваториях, проектирования сооружений и планирования морских операций на шельфе.

Ключевые слова: ветровое волнение, шторма, статистика штормов.

A. V. Boukhanovsky¹, L. I. Lopatoukhin^{1,2}

¹Saint-Petersburg State University of information technologies, mechanics and optics

²Saint-Petersburg State University

STORMS STATISTICS AT SEA (ALTERNATIVE APPROACH)

The classic (Euler) approach to storms statistics was based on time-series analysis of wave parameters at certain points (regions) of water area and allowed to assess the spatial structure of the storm only by indirect methods. The modern (Lagrangian) approach to the calculation of wave climate (wave regime) includes forming a database by calculations on numerical hydrodynamic models of ocean dynamics. The calculations are performed with discreteness of 3—6 hours for a continuous time of 30 years or more. Thus a long-term sequence of the wave fields of the estimated area is formed. The availability of information about the waves simultaneously throughout the whole basin allows to follow the storm movement in time and space. As a result, it is possible to estimate the parameters of the storms and their trajectories, i. e. significantly expand the set of statistics characterizing the storm activity at sea and ocean. The specificity of spatial-temporal variability of the various water areas of the World Ocean and the differences in the wave climate are demonstrated with the example of statistics of parameters of storms and their trajectories for open North Atlantic and closed Black Sea. The obtained data are useful for the safety of navigation in open water areas, for designing of facilities and planning of marine operations offshore.

Key words: wind waves, storms, storm statistics.

Классический (эйлеровский) подход к статистике штормов состоит в анализе временных рядов высот волн в отдельных точках (районах) акватории. Исходными данными являются результаты многолетних измерений (при их наличии) или численных расчетов. Альтернативой эйлеровскому является лагранжев подход, в котором рассматриваются как параметры штормов во всех расчетных точках акватории, так и их характеристики в последовательные моменты времени. Возможность реализации такого подхода появилась в последние 20 лет в связи с принципиальными изменениями

концепции расчета режима волнения (волнового климата). Элементы данной концепции заложены в основе инженерной деятельности ведущих компаний, выполняющих гидрометеорологические изыскания на шельфе Мирового океана, и связаны со следующими обстоятельствами [1—4]:

- появлением численных моделей, позволяющих рассчитывать основные параметры волнения;
- созданием массивов входных данных для реализации в численных моделях волнения (в результате выполнения международных проектов по реанализу метеорологических данных);
- прогрессом в развитии вычислительной техники, позволивший создавать расчетные поля волнения с любой дискретностью за десятки лет.

Под реанализом понимается восстановление пространственно-временных полей метеорологических характеристик в узлах регулярной сетки по данным наблюдений, используя модели динамики атмосферы. Эта процедура выполняется практически для всех метеорологических величин, включая атмосферное давление, температуру воздуха, скорость ветра, осадки, облачность, влажность и т. д. В настоящее время наиболее известны проект реанализа NCEP/NCAR, созданный в США для всего Земного шара и имеющийся в открытом доступе, а также аналогичные проекты, реализованные Европейским центром среднесрочных метеопрогнозов (ECMWF). Для отдельных районов существуют региональные разработки с большей пространственной детализацией. Данные в настоящей статье получены, используя сведения о ветре из реанализа NCEP/NCAR за 40 лет, по которым рассчитаны поля волнения. Для этого использованы широко известные, описанные в многочисленных публикациях и апробированные при решении прикладных задач, спектральные гидродинамические модели. Для Черного моря расчеты выполнены по модели SWAN версия 40.41 на сетке, содержащей 2600 ячеек с шагом по времени 30 мин. Расчеты для Северной Атлантики выполнены по модели Wave Watch.

Шторм и его параметры. При Лагранжевом подходе шторм рассматривается как структура, которая в фиксированный момент времени занимает некоторое пространство, т. е. некоторую площадь на акватории бассейна. При численном моделировании эта область включает конечный набор узлов сеточной области. В любом бассейне эволюция шторма может быть описана моделью случайного импульсного поля [5]:

$$\zeta(\vec{r}, t) = \sum_k W_k^{z(\vec{r})}(\vec{r}, t | X).$$

Здесь $W_k^{z(\vec{r})}(\bullet)$ — пространственно-временной $(\vec{r}, t)$ импульс выше порога $z(\vec{r})$, характеризуемый максимальной высотой волны $h^+(t)$ и площадью $S_\Omega(t)$, где область шторма Ω составляет часть от всей площади акватории (рис. 1). Геометрический центр шторма движется с некоторой скоростью по траектории $\vec{r}_0 = \vec{r}_0(t)$. Размер шторма $\{r_0(t), h^+(t), S_\Omega(t)\}$ равен площади где высоты волн больше порога z . Параметризация $\{h^+(t), r_0(t), S_\Omega(t)\}$ задает систему зависимых временных рядов, по которым выделяются n выборок наибольших волн в k штормах за n лет ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k$).

Статистика штормов описывается через две группы статистических величин — параметры шторма (случайного импульса) и параметры траектории движения шторма.

Параметры шторма. Ниже приведены основные параметры шторма (рис. 1—3):

- наибольшая площадь шторма S (за все время его существования независимо от положения);
- геометрический центр шторма C_s ;
- «центр тяжести» шторма C_m ;
- положение наибольшей волны в шторме $C_{\max}$;
- наибольшая высота волны $h_{\max}$ в шторме (за все время его существования независимо от положения);
- главная (наибольшая) ось эллипса шторма λ_1 ;
- вторая ось эллипса шторма λ_2 ;
- эквивалентный диаметр $L = \sqrt{4S/\pi}$ или радиус $R = \sqrt{S/\pi}$ шторма (соответствует окружности на рис. 1);
- анизотропность шторма (отличие формы от окружности) $\chi = \lambda_1/\lambda_2$;
- асимметрия шторма $|C_m - C_g|/D$;
- угол вращения α .

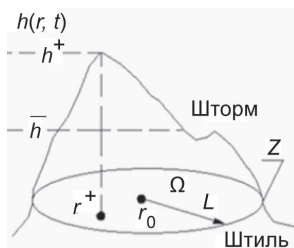


Рис. 1. К определению шторма.

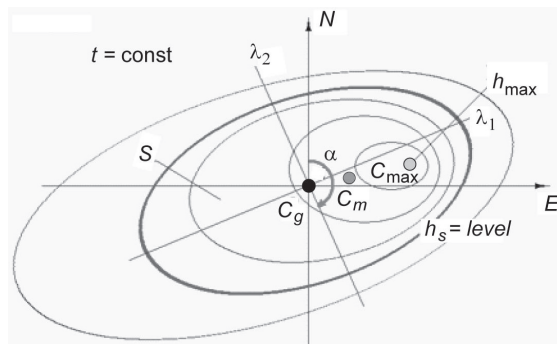


Рис. 2. Пространственные параметры шторма.

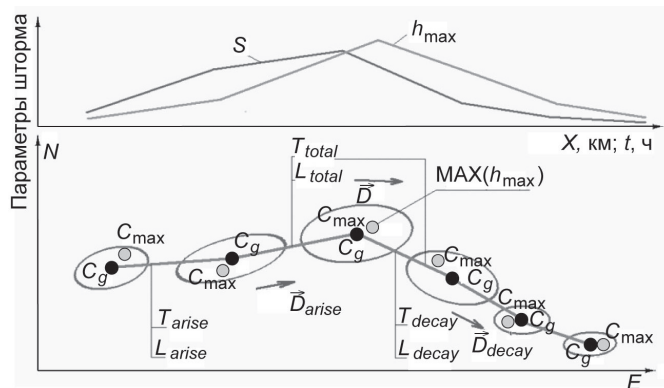


Рис. 3. Параметры траектории шторма.

Параметры траектории шторма.
Основные параметры траектории шторма (рис. 3):

- время жизни (длительность) шторма T ;
- длина траектории S ;
- среднее направление движения шторма $\bar{D}$;
- максимальная высота волны за все время существования шторма $H_{\max}$;
- длительность шторма до и после достижения максимума по высоте $T_{\text{arise}}, T_{\text{decay}}$;
- длина траектории до и после достижения максимума по высоте $L_{\text{arise}}, L_{\text{decay}}$;

- среднее направление движения до и после достижения максимума по высоте $\bar{D}_{\text{arise}}, \bar{D}_{\text{decay}}$;
- скорость шторма (за все время, до и после достижения максимума по высоте) $V = L/T$;
- пространственная асимметрия шторма $L_{\text{arise}} / L_{\text{decay}}$;
- асимметрия шторма по времени $T_{\text{arise}} / T_{\text{decay}}$;
- изменение траектории $\bar{D}_{\text{arise}} - \bar{D}_{\text{decay}}$.

Статистика штормов различных акваторий. На рис. 4 показано движение шторма на обширной акватории Северной Атлантики (рис. 4, а) и на замкнутой акватории Черного моря (рис. 4, б). На врезке рис. 4, а показаны изменения значительных высот волн в двух точках акватории. Впервые

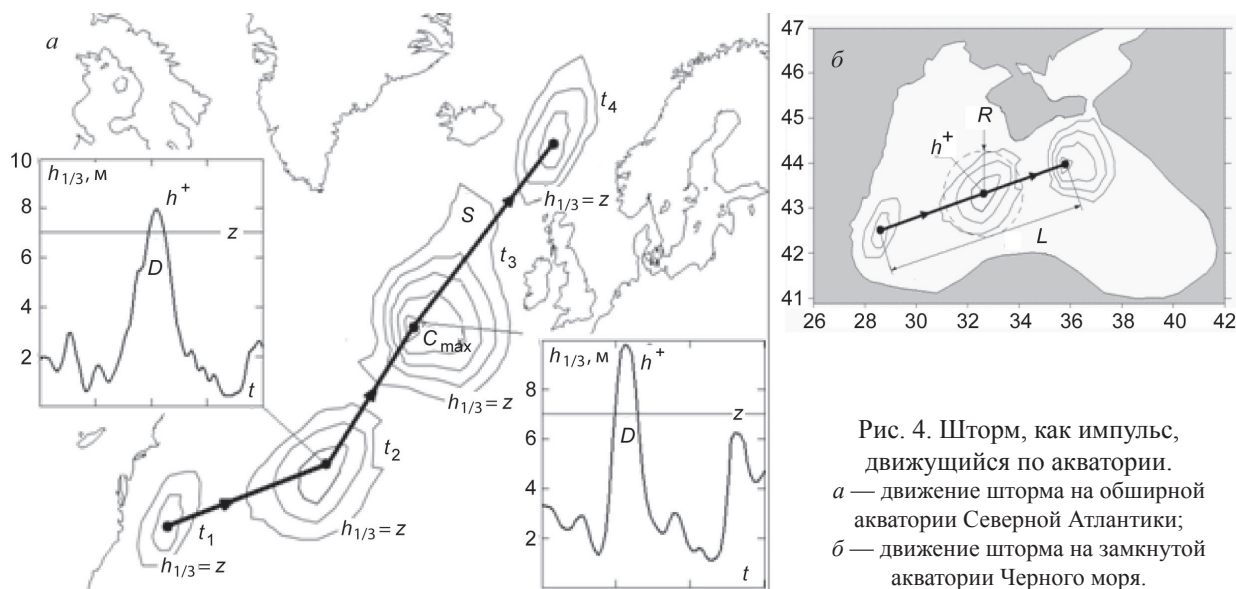


Рис. 4. Шторм, как импульс, движущийся по акватории.
а — движение шторма на обширной акватории Северной Атлантики;
б — движение шторма на замкнутой акватории Черного моря.

некоторые пространственные характеристики штормов представлены в справочниках нового поколения, изданных российским морским регистром судоходства [4].

В табл. 1, для Черного моря [6] приведены статистические характеристики штормов различной интенсивности (интенсивность задавалась через значения высот волн 3 % обеспеченности $h_{3\%}$).

Из таблицы видно, что:

- с увеличением интенсивности общее число штормов уменьшается (с 2289 до 46);
- при относительно малых значениях h на акватории может быть несколько независимых штормов одновременно в разных частях моря, при высоких (начиная с 7 м) — только один;
- среднее время жизни шторма уменьшается с увеличением уровня (с 25 до 13 ч), также уменьшается и максимальное время жизни (для 9 м — 90 ч);
- эквивалентный радиус сначала увеличивается, а потом — несколько убывает. Это связано с тем, что для самых сильных штормов площадь, охваченная штормом, не увеличивается, т. к. его размеры ограничены береговой линией;
- длина траектории шторма уменьшается с ростом h (по максимуму — от 1395 до 400 км) — также как и время жизни шторма. При этом величина 1395 км для $h \geq 2.5$ м, относится не к одному шторму, а к последовательности разных штормов, которые наложились друг на друга (центр шторма мог перемещаться по морю);
- средняя скорость перемещения шторма 5—9 км/ч, максимальная скорость может достигать 31 км/ч.

Для сопоставления данных табл. 1 с параметрами штормов других акваторий приведена табл. 2 для штормов Северной Атлантики [7]. Очевидны различия статистик из табл. 1 и 2, связанные с пространственными размерами акваторий рассматриваемых бассейнов.

Сравнительный анализ параметров штормов различных акваторий показывает, в частности, что длина траектории шторма зависит от размеров акватории: в С. Атлантике, в среднем, около 900 км, в Баренцевом море около 400 км, а в Черном — 100—150 км. Скорость перемещения шторма

Таблица 1

Статистические характеристики штормов Черного моря

Статистические характеристики		Высоты волн 3 % обеспеченности ($h_{3\%}$, м)				
		≥ 2.5	≥ 4.0	≥ 5.5	≥ 6.5	≥ 7.5
Количество штормов		2289	766	260	118	46
Распределение числа (%) одновременно существующих штормов	0	73.6	91.8	97.9	99.7	99.8
	1	23.2	8.0	2.1	0.3	0.2
	2	3.1	0.2	—	—	—
	≥ 3	0.1	—	—	—	—
Высота волны h^+ , м	m_x	3.6	5.4	6.7	7.4	8.2
	σ_x	1.3	1.1	0.8	0.7	0.6
	$\max[x]$	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Время жизни шторма D , ч	m_x	25	21	16	13	14
	σ_x	25	18	12	11	11
	$\max[x]$	174	117	75	69	60
Эквивалентный радиус шторма R , км	m_x	87	86	117	104	106
	σ_x	56	46	57	60	54
	$\max[x]$	211	188	275	256	229
Длина траектории шторма L , км	m_x	164	149	154	121	112
	σ_x	190	141	133	118	104
	$\max[x]$	1395	847	563	471	422
Средняя скорость шторма V , км/ч	m_x	5	6	9	8	7
	σ_x	4	5	6	7	5
	$\max[x]$	23	22	29	31	21

Таблица 2

Статистические характеристики штормов различной интенсивности. Северная Атлантика

Параметр	$h \geq 5$ м			$h \geq 7$ м			$h \geq 9$ м		
	Среднее	СКО	Max	Среднее	СКО	Max	Среднее	СКО	Max
Наибольшая значительная высота h_{sign} , м	7.03	2.34	22.6	9.3	2.41	22.6	11.5	2.3	22.6
Условная площадь шторма в зависимости от наибольшей h_{sign} , км ²	596.9	1089.9	10116.8	409.9	654.4	6113.9	320.6	420	4094.8
Время жизни шторма, ч	26.4	28.5	243	26.7	24.6	150	26.1	20.4	138
Время увеличения (роста) h_{sign} , ч	13.5	15.09	174	13.6	12.9	93	13.5	12.9	93
Максимальная площадь на траектории, км ²	724.7	1361.8	13593.9	496.2	804.4	8017.6	387.1	517.0	4654.1
Время усиления (роста) площади, ч	14.61	43.83	174	14.76	14.4	99	14.76	14.4	99
Длина траектории, км	905.9	4700.38	31400.9	926.7	1052.4	5925	926.3	887.8	5118
Среднее направление траектории, градусы от севера	219.5	82.63	360	223.0	80.4	360	233.6	73.0	360
Длина траектории роста, км	389.9	612.2	6098	426	585.4	4123	406.9	456.4	3251
Среднее направление траектории усиления шторма, градусы от севера	209.1	71.17	360	215.4	72.8	360	224.8	71.2	359
Длина траектории ослабления шторма, км	451.0	673.5	8117	500.1	636.0	4344	519.4	567.9	3844
Среднее направление траектории ослабления шторма, градусы от севера	210.7	77.94	360	217.2	77.5	360	227.2	73.8	360
Общее количество штормов	4682			2367			1032		

Примечание: СКО — среднее квадратическое отклонение.

зависит от его интенсивности и может в Северной Атлантике изменяться от 20 до 70 ч. На рис. 5, 6 приведены оценки совместных вероятностей параметров штормов Северной Атлантики [7].

Из рис. 5 видно, что с увеличением длительности шторма возрастает вероятность появления больших волн. Однако разброс данных достаточно существен. Кроме того, очевидна пространственная изменчивость рассматриваемых статистик. В частности, в умеренной зоне (рис. 5, а) в шторме длительностью 80 ч с вероятностью 0.1 % могут встречаться волны высотой 18 м. Для субтропической зоны (рис. 5, б) в штормах такой длительности максимальная высота значительных волн с той же вероятностью не превысит 15 м.

На рис. 6 сравниваются статистики длительности штормов, их площади и максимальных высот при лагранжевом подходе. Поясним различия между данными рис. 5, б и 6, б. При эйлеровом подходе длительность шторма — это время, в течение которого шторм продолжается в конкретной точке, при лагранжевом подходе шторм — это суммарное время с момента зарождения шторма до его затухания да данной акватории. По этой причине на рис. 5, б максимальная продолжительность шторма — примерно 90 ч, а на рис. 6, б — около 130 ч.

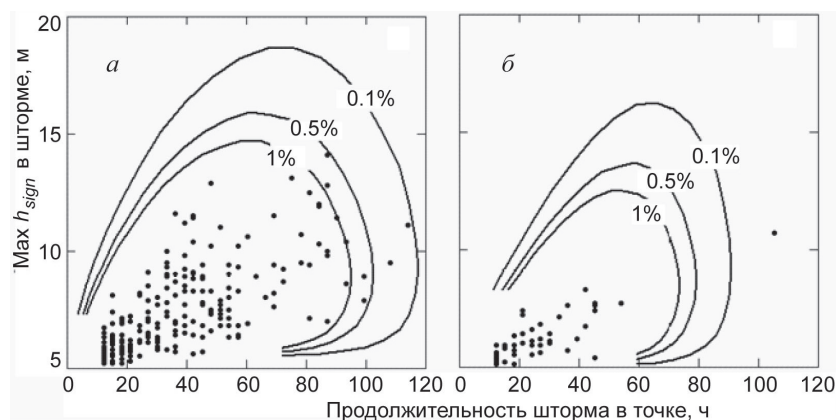


Рис. 5. Совместные вероятности длительности штормов (с максимальной высотой более 5 м) и максимальной значительной высотой волны в шторме. Северная Атлантика.
а — 48° с.ш., 08° з.д.; б — 34° с.ш., 10° з.д.

Расчет режима волнения только для конкретной точки реализует классический Эйлеровский подход к статистике штормов. Такой подход позволяет оценивать локальные свойства штормов. При исследовании глобальных явлений необходим переход от локальных к пространственным характеристикам. Наличие данных о волнении одновременно во всех расчетных точках, покрывающих рассматриваемую акваторию, позволяет использовать Лагранжев подход. В результате, появилась возможность оценивать как параметры штормов, так и их траектории. Набор таких разнообразных (см. рис. 2, 3 и соответствующий текст), ранее отсутствующих статистик и некоторых их значений для конкретных акваторий приводится в настоящей статье. Полученные данные полезны для обеспечения безопасности мореплавания на обширных акваториях [4] и планирования морских операций на шельфе [1].

Литература

1. Мирзоев Д. А., Зильберштейн О. И., Лопатухин Л. И., Миронов Е. У., Михайлов Н. Н. Концепция обеспечения специализированной гидрометеорологической информацией проектирования сооружений на шельфе арктических морей // Тр. IV Междун. конф. «Освоение шельфа арктических морей». RAO 99. Ч. 1. Санкт-Петербург, 1999. С. 311—318.
2. Ewans K. C. Metocean data and models for application in the offshore industry // Marine Technology and Engineering / Eds. C. Guedes Soares et al. Taylor and Francis, 2011, P. 69—77.
3. Лопатухин Л. И. Ветровое волнение. Учебное пособие. 2-е дополненное издание. СПб: Изд-во СПбГУ, 2012. 165 с.
4. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Чернышева Е. С. Новое поколение справочников по режиму волнения морей // Научно-технический сборник Российского морского Регистра судоходства. 2011. Вып. 34. С. 50—65.
5. Lopatoukhin L. I., Boukhanovsky A. V. Statistics of extreme and freak waves // Proc. of 25 Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2006). June 4—9, 2006, Hamburg, Germany.
6. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Чернышева Е. С., Колесов А. М. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 и статистики экстремальных штормов моря // Изв. русского географического общества. 2009. Вып. 2. С. 71—84.
7. Boukhanovsky A. V., Soares C. G., Bernardino M. Alternative approaches to storm statistics in the ocean // Proc. 27 Intern. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering. (OMAE 2008). June 15—20, 2008, Estoril, Portugal.

Статья поступила в редакцию 04.02.2015 г.

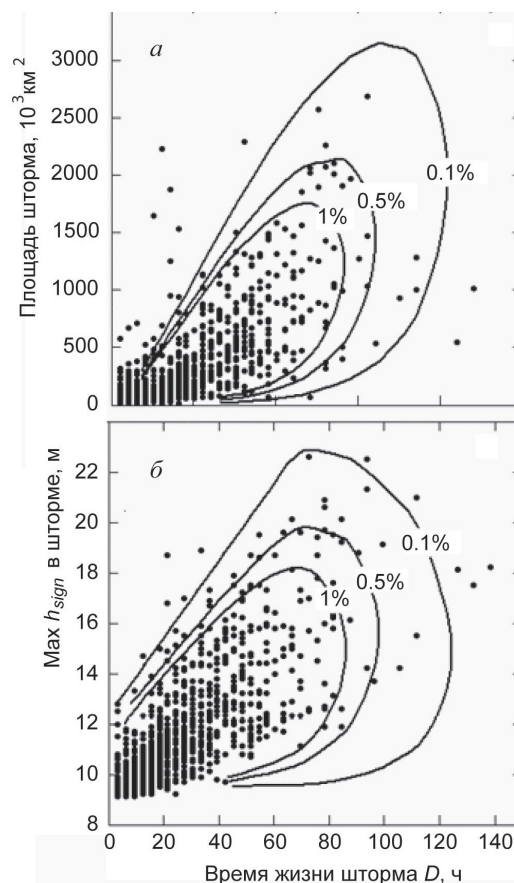


Рис. 6. Совместные вероятности для штормов со значительной волной более 9 м.
а — время жизни шторма и его размеров;
б — время жизни шторма и максимальной волны в нем.