

Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры

В. В. Ефимов*, О. И. Комаровская, Т. М. Баянкина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: vefim38@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2019 г., после доработки – 17.04.2019 г.

Цель. Изучены характеристики и повторяемость новороссийской боры по данным стандартных измерений на гидрометеорологической станции Новороссийск и данным климатического реанализа *RegCM* с использованием региональной численной модели с повышенным пространственным разрешением. Общефизический интерес представляют случаи боры с максимальной скоростью $U \geq 30$ м/с и минимальной отрицательной температурой.

Методы и результаты. По многолетним ежедневным данным из архивов станции Новороссийск и информации баз данных Росгидромета (<https://rp5.ru>) за 1901–2017 гг. получены статистические значения по числу суток с борой за холодный и теплый периоды, количеству случаев боры при различной их продолжительности в сутках и повторяемости по месяцам за 1901–2017 гг. Современные региональные численные модели, разработанные в Морском гидрофизическом институте, позволяют учесть роль орографии в генерации новороссийской боры, определить ее локализацию и изучить эволюцию термодинамических полей сильной боры в процессе ее развития и затухания. Дана оценка повторяемости экстремальных скоростей ветра при истинной боре методом аппроксимации кумулятивной функции ряда распределением Вейбулла. При анализе синоптических особенностей формирования боры использованы данные регионального *RegCM* и *ERA-Interim* реанализов за 1979–2013 гг. на поверхности и на модельных уровнях. Построены розы ветров для точек у наветренного и подветренного склонов.

Выводы. Получено среднегодовое число суток с борой за исследуемый временной ряд, равное 30. Наибольшая продолжительность случаев боры приходится на зимние месяцы и может составлять до 7 сут. Из массивов модельных расчетов выбраны поля давления и скорости ветра, соответствующие сильной боре, и классифицированы методом кластерного анализа. Построены композиты полей давления и ветра. Показано, что условием развития сильной боры является формирование двух центров давления – северного циклонического и южного антициклонического. Приведены вертикальные профили температуры, скорости ветра и частоты плавучести для двух основных кластеров. По данным измерений на гидрометеорологической станции Новороссийск оценены временные характеристики боры. Показано, что для формирования истинной боры необходимо интенсивное низкотропосферное течение воздуха со скоростью 10–15 м/с, сопровождающееся инверсией температуры на высоте около 1 км и формированием нижележащего слоя устойчиво стратифицированного воздуха.

Ключевые слова: новороссийская бора, повторяемость, кластерный анализ, число Фруда, частота плавучести.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М. Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 409–422. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-409-422

© Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М., 2019

Temporal Characteristics and Synoptic Conditions of Extreme Bora Formation in Novorossiysk

V. V. Efimov*, O. I. Komarovskaya, T. M. Bayankina

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

**e-mail: vefim38@mail.ru*

Purpose. Bora in Novorossiysk is the strong, cold, gusting northeast wind directed to the sea on a ridge slope. As the dangerous phenomenon of weather it happens in winter at the wind speed more than 30 m/s, therefore, bora cases with maximum speed and minimum subzero temperature are of practical and all-physical interest.

Methods and Results. According to long-term daily data from the archives at the station Novorossiysk and observations from the Russian Hydrometeorological Institute (<https://rp5.ru/>) for the period 1901–2017 statistics on the number of days with bora for cold and warm periods and the number of bora cases with different duration of the day and their repeatability by month for the period 1901–2017 are obtained. Modern regional numerical models developed in the Marine Hydrophysical Institute permit to take into account the role of orography in generation of the Novorossiysk bora, to define its localization and to study evolution of thermodynamic fields of a strong bora during its development and attenuation. The estimation of the repeatability of extreme wind speeds at true bora by the method of approximation of the cumulative function of the series by the Weibull distribution is given. In the analysis of synoptic features of bora formation, the data of RegCM regional reanalysis for the period 1979–2013, as well as data of ERA Interim reanalysis at model levels were used. Roses of winds for points at windward and leeward slopes are constructed.

Conclusions. It was found that the average annual number of days with bora for the study time series is 30. The greatest duration of cases with bora falls on the winter months and can be up to 7 days. From the arrays of reanalysis data, the fields of pressure and wind speed corresponding to a strong bora are selected and classified by the cluster analysis method. Composites of pressure and wind fields are constructed. It is shown that the condition for the development of a strong bora is the formation of two pressure centers – the northern cyclonic and southern anticyclonic. Vertical profiles of temperature, wind speed and buoyancy frequency for 2 main clusters are presented. According to the measurements on the Novorossiysk HMS, the time characteristics of the bora were estimated. It is shown that the main features necessary for the formation of a true bora is an intense low – atmospheric air flow with velocities of about 10–15 m/c, accompanied by temperature inversion at an altitude of about 1 km and the formation of the underlying layer of stably stratified air.

Keywords: bora in Novorossiysk, repeatability, cluster analysis, Froude number, buoyancy frequency.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme No. 0827-2018-0001 “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate” (code “Ocean and atmosphere interaction”).

For citation: Efimov, V.V., Komarovskaya, O.I. and Bayankina, T.M., 2019. Temporal Characteristics and Synoptic Conditions of Extreme Bora Formation in Novorossiysk. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(5), pp. 361-373. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-361-373

Введение

Наиболее опасным погодным явлением в холодный сезон года на восточном побережье Черного моря является новороссийская бора – сильный, холодный, порывистый северо-восточный ветер, направленный на море по склону горного хребта. Разделение новороссийской боры на пять типов (стоковая, внутримассовая, муссонная, фронтальная и смешанная) [1] до сих пор используется в научной литературе, хотя ее можно отнести к любому ветру с гор, даже к бризовой циркуляции [2]. При таком разделении к случаям боры

относятся и ветры в теплый сезон года, когда скорость ветра превышает условный уровень 15 м/с. Но истинная, или настоящая, бора («истинная бора отмечается только при полярных и особенно ультраполярных вторжениях холода» [2, с. 52]) сопровождается, кроме больших скоростей, значительными понижениями температуры (вплоть до -10 , -15 °С), приводит к большим убыткам в хозяйственной деятельности и наблюдается только в холодное время года. Таким образом, борой можно назвать лишь фронтальную бору, которая наиболее часто повторяется в зимний сезон (имеет повторяемость около 73 % [1]) и возникает вследствие полярных или ультраполярных вторжений холодного воздуха [2].

Самый эффективный метод изучения гидродинамических процессов развития боры – численное моделирование с использованием современных региональных атмосферных моделей [3]. Моделирование позволило существенно дополнить представления о характере гидродинамических процессов формирования боры на примере природных процессов, развитых и описанных ранее в многочисленных работах по проблеме горных ветров [4, 5]. Показано, что бора, как один из видов горного ветра, в первом приближении определяется отношением скорости ветра U к высоте горы h и частоте плавучести N в нижнем слое атмосферы на высотах, сравнимых с высотой горы. Численной мерой режима обтекания потоком воздуха горы служит число Фруда $Fr = U / hN$. Не вдаваясь в детали (см. работу [6]), отметим, что необходимыми условиями развития сильной боры являются большая скорость ветра и устойчивая стратификация нижнего слоя атмосферы в области наветренного склона гор. От значения числа Фруда зависит структура боры в области подветренного склона: при значениях $Fr < 1$ струйное течение боры прижимается к подветренному склону, образуя низкотропосферное течение, в противном случае струя колеблется по вертикали, образуя верховую бору.

Важная особенность развития боры связана с особенностями рельефа гор. На юге, южнее Туапсе, расположены высокие Кавказские горы. Натекающий с востока и северо-востока ветер огибает их с севера, приводя к усилению северо-восточного ветра в нижней части атмосферы в районе наветренного склона гор в области Новороссийска.

Цель настоящей работы – изучение характеристик повторяемости новороссийской боры по данным стандартных измерений на гидрометеорологической станции (ГМС) Новороссийск, а также по данным климатического реанализа *RegCM*, полученным в Морском гидрофизическом институте с использованием региональной численной модели с повышенным пространственным разрешением. При этом основное внимание будет уделено изучению повторяемости и условий возникновения в зимнее время года так называемой истинной боры, характеризующейся не только большими скоростями, но и низкими значениями приземной температуры воздуха.

Используемые данные

Работа основана на многолетних архивных данных Росгидромета по ГМС Новороссийск и данных архива (<https://rp5.ru/>) за 1901–2017 гг. (117

лет). Также были использованы данные реанализа *RegCM*¹ за 1979–2013 гг. [7] с разрешением 25 км (приведенный к регулярной сетке с шагом 0,11°) и *ERA-Interim* за годы с 1979 по 2017 [9] с разрешением около 80 км (приведенный к регулярной сетке с шагом 0,75°). Все использованные модельные данные имеют временной интервал 6 ч.

Архив по скорости и направлению ветра за 117-летний период наблюдений на станции Новороссийск статистически неоднороден. Наблюдения за ветром на метеостанции Новороссийск за весь период проводились на высоте 10 м, что соответствует рекомендациям ВМО [10]. С 1901 по 1960 гг. измерения в гидрометеорологической сети проводились визуально по флюгеру Вильда, а с 1961 г. по настоящее время – инструментально при помощи анеморумбометров М47 и М63М1 и других измерительных приборов. При визуальных наблюдениях (по флюгеру) осуществлялось осреднение скорости и направления ветра за 2 мин, а при инструментальных (с 1961 г.) – проводилось 10-минутное осреднение (согласно требованиям ВМО 10-минутный интервал осреднения скорости ветра является основным для характеристики устойчивого ветрового потока во времени). Кроме того, сроки наблюдений (трех-, четырех- и восьмисрочные) не совпадают. Принимая во внимание эти различия, данный ряд наблюдений (1901–2017 гг.) можно разделить на два массива.

Первый массив (первый период: 1901–1960 гг.) сформирован по данным визуальных наблюдений (по флюгеру) [1]. Он включает данные по годам с распределением по месяцам ветров северо-восточного направления со скоростью $U \geq 15$ м/с, при этом ураганный ветер со скоростью $U \geq 30$ м/с выделен отдельно.

Второй массив (второй период: 1961–2017 гг.) включает ежедневные четырех- и восьмисрочные наблюдения скорости и направления ветра. Характер суточного хода скорости ветра достаточно хорошо выявляется уже по данным четырехсрочных наблюдений, поэтому ряды четырех- и восьмисрочных наблюдений объединены. Пропущенные сроки в четырехсрочных наблюдениях дополнены значениями скорости, усредненными между соседними по времени измерениями.

Результаты анализа

Повторяемость боры. Условно будем рассматривать каждый год как совокупность холодного (с октября по март) и теплого (с апреля по сентябрь) сезонов. Следуя работе [1], сутки будем считать сутками с борой, если в один из синоптических сроков отмечался ветер северо-восточного направления со скоростью 15 м/с и более, а если при этом ветер северо-восточного направления дул сутки и более, то этот промежуток времени будем рассматривать как случай боры. Для всех сезонов в каждом периоде измерений проведена выборка данных с указанными параметрами ветра и подсчитано число суток с борой, а также рассчитана их повторяемость. Результаты приведены в табл. 1.

¹ Массив данных численного реанализа характеристик атмосферной циркуляции Черноморско-Каспийского региона за период 1979–2013 гг. [Электронный ресурс] : база данных / В. В. Ефимов, В. С. Барабанов, Д. А. Яровая, А. В. Юровский, Т. М. Баянкина ; ФГБУН МГИ РАН. Электрон. дан. (1,2 Тб). Севастополь, 2017. Внешний HDD Seagate. Систем. требования: от 486 DX2 ; 66 МГц ; видеоплата 1 Мб (VESA) ; зв. плата SB-совместимая ; DOS 6.2 или выше ; Windows 95. № гос. регистрации 2017620805.

Число суток с новороссийской борой за 1901–2017 гг. в холодный и теплый сезоны и их повторяемость
Number of the days of the Novorossiysk bora in 1901–2017 in cold and warm seasons and its repeatability

Сезон / Season	Первый период (1901–1960 гг.) / The first period (1901–1960)		Второй период (1961–2017 гг.) / The second period (1961–2017)	
	Число суток с борой / Number of the bora days	Повторяемость, % / Repeatability, %	Число суток с борой / Number of the bora days	Повторяемость, % / Repeatability, %
холодный (октябрь – март) / cold (October – March)	1245	11,4	1265	12,2
теплый (апрель – сентябрь) / warm (April – September)	557	5,1	394	3,8

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что в холодный сезон число суток с борой и их повторяемость в оба периода отличаются незначительно (менее 1 %). В теплый сезон года в первом периоде число суток с борой на 1,3 % больше, чем во втором. Разница между этими оценками числа суток с борой статистически незначима. Среднегодовое число суток с борой за исследуемый 117-летний временной ряд равно 30. Это значение близко к следующим оценкам источников: 32 сут [1], 45 сут [2, 3] и от 30 до 40 сут [11]. Следует отметить, что фактическая картина распределения случаев боры в отдельные годы значительно отличается от средней. В табл. 2 приведены статистические данные по годам с максимальным и минимальным количеством суток с борой.

Распределение среднего количества суток с борой по месяцам представлено в табл. 3. Из табл. 3 следует, что среднемесячное количество суток с борой в холодный сезон составляет до 3 сут, минимальная температура воздуха опускается до –20 °С. Рассмотрим теперь данные измерений с точки зрения количества случаев боры и продолжительности каждого случая (табл. 4).

На сезон с сентября по март приходится 76,4 % всех случаев боры, а с апреля по август – 23,6 %. Полученные результаты близки к оценкам, данным в работе [1]. Наибольшая средняя продолжительность случаев с борой приходится на зимние месяцы (до 7 сут), минимальная – на летние (до 1–2 сут) (табл. 4). Но, как указывалось выше, наибольший практический и общефизический интерес представляют случаи боры с максимальной скоростью и минимальной отрицательной температурой. Такие случаи истинной боры рассмотрим более подробно далее.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Распределение по периодам данных о годах с числом суток с борой, ббльшим либо равным 40 и меньшим либо равным 10
Distribution of the years containing the bora days the number of which exceeds or equals 40 and is lower or equals 10

Периоды / Periods	Годы, в которые наблюдалось 40 и более сут боры в год / Years when bora was observed 40 and more days per year	Максимальное количество суток с борой (год) / Maximum number of bora days (year)	Годы, в которые наблюдалось 10 сут и менее боры в год / Years when bora was observed 10 and more days per year	Минимальное количество суток с борой (год) / Minimum number of bora days (year)
1901–1960	1904, 1907, 1911, 1919, 1920, 1921, 1924, 1927, 1928, 1929, 1953, 1954	66 (1929 г.); 68 (1953 г.)	1908, 1923, 1938	2 (1923 г.)
1961–2017	1972, 1976, 1977, 1980, 1984, 1987, 2002, 2003, 2005, 2008, 2014	54 (1976 г.)	1962, 1964, 1965, 1966, 1967, 1989	3 (1965 г.)

П р и м е ч а н и е. Данные за 1901–1954 гг. взяты из работы [1], за 1955–2017 гг. – из наблюдений ГМС Новороссийск

N o t e: The data for 1901–1954 are from [1], for 1955–2017 – from the observations at the Novorossiysk hydro-meteorological station

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Среднее количество суток с борой и минимальная температура воздуха во время боры по месяцам за 1901–2017 гг.
Monthly average number of the bora days and minimum air temperature during bora in 1901–2017

Параметры / Parameters	Месяцы / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Среднее количество суток с борой / Average number of bora days	2,7	2,6	2,4	2,0	1,9	1,4	1,5	1,8	2,4	2,7	2,8	2,9
$T_{\text{мин}}, ^\circ\text{C}$ / $T_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$	-19,3	-19,8	-10,1	0,0	5,8	15,4	15,6	15,0	5,5	-3,5	-9,3	-18,9

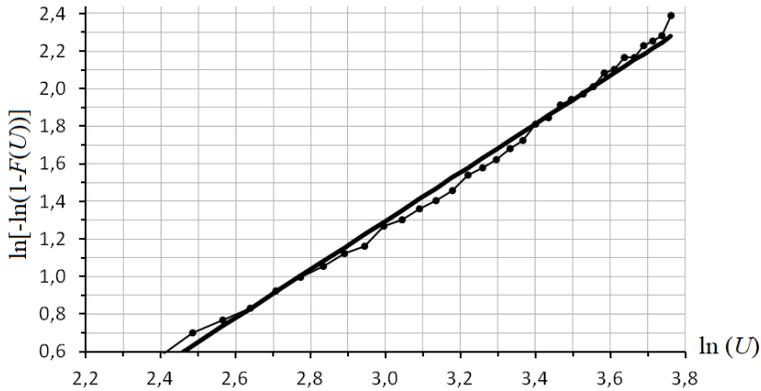
**Распределение количества случаев боры
по месяцам за 1901–2017 гг.
Monthly distribution of a number of the bora cases
in 1901–2017**

Параметры / Parameters	Месяцы / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Продолжитель- ность боры, сут / Bora duration, day												
1–2	112	124	141	103	71	35	47	62	98	137	128	105
3–4	41	44	21	13	9	4	3	7	30	36	35	43
5–6	13	8	8	2	2	0	0	0	2	4	3	11
≥ 7	3	2	4	0	1	0	0	0	5	0	4	3
Общее количество случаев боры / General amount of bora cases	169	177	174	118	83	39	50	69	135	177	170	162
Повторяемость боры, % / Repeat- ability of bora, %	4,7	5,4	4,8	3,4	2,3	1,1	1,4	1,9	3,8	4,9	4,8	4,5

Для оценки повторяемости скоростей ветра при истинной боре из имеющихся инструментальных данных измерений на ГМС Новороссийск за 1961–2017 гг. были выбраны значения скорости ветра не менее 15 м/с при температуре воздуха не более $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за четыре месяца холодного периода года с декабря по март. Для оценки повторяемости экстремальных скоростей ветра необходимо знание кумулятивной функции распределения скорости ветра $F(U)$. Общепринято теоретическое распределение Вейбулла, которое хорошо согласуется с результатами наблюдений. Функция распределения Вейбулла имеет следующий вид: $F = 1 - [\exp(-U / \lambda)^k]$, где $\lambda > 0$ – параметр масштаба; $k > 0$ – параметр формы распределения Вейбулла. По исходному ряду построен график кумулятивной функции распределения в координатах распределения Вейбулла, представленный на рис. 1.

Прямая – линия тренда, проведенная в нашем случае методом наименьших квадратов, которая соответствует распределению Вейбулла в координатах $\ln(-\ln(1 - F(U)))$ и $\ln(U)$, где U – скорость ветра. Как видно, она близко аппроксимирует экспериментальную функцию распределения. Наклон прямой определяется значением параметра k , точка пересечения с осью абсцисс рассчитывается по формуле $k \ln(\lambda)$. В нашем случае $\lambda = 4,69$ и $k = 1,29$. В табл. 5 приведены значения повторяемости, оцененные по исходному ряду

измерений ($P = m / (n + 1)$), где n – длина рассматриваемого ряда, а m -е наблюдение в порядке возрастания фиксирует значение, для которого рассчитывается повторяемость), и по аппроксимирующему распределению (повторяемость $P = 1 - F(U)$, период повторяемости $T = 1 / [1 - F(U)]$), для больших величин скорости боры.



Р и с. 1. Аппроксимация кумулятивной функции распределения скорости ветра с помощью распределения Вейбулла

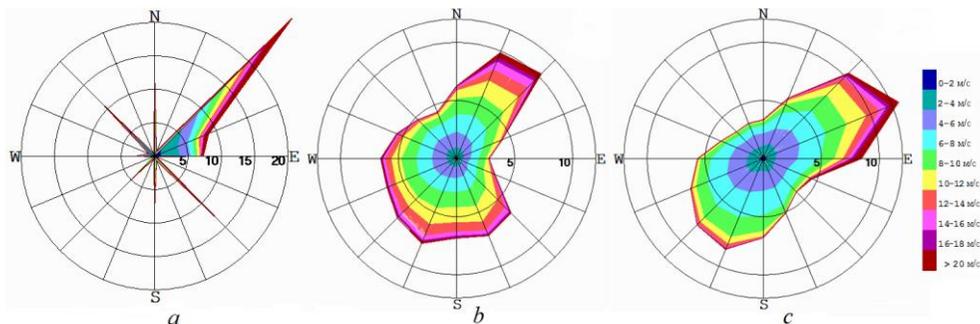
F i g. 1. Approximation of the cumulative function of wind speed distribution by the Weibull distribution

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Повторяемость больших скоростей ветра при боре
Repeatability of high wind speeds during bora

Параметры / Parameters	Скорость ветра U , м/с / Wind speed U , m/s					
	20	25	30	35	40	45
Повторяемость, рассчитанная по ряду, % / Repeatability calculated by a series, %	2,880	0,940	0,220	0,056	0,009	0,002
Повторяемость, рассчитанная по распределению Вейбулла, % / Repeatability calculated by the Weibull distribution, %	2,640	0,790	0,220	0,056	0,014	0,003
Период повторяемости по распределению Вейбулла, дней / Repeatability period based on the Weibull distribution, days	19	65	234	2,47	10,1	43,4

Синоптические особенности формирования боры. На рис. 2 приведены розы ветров, построенные для трех разных точек.



Р и с. 2. Розы ветров, построенные по данным ГМС Новороссийск (*a*), по данным реанализа RegCM для ближайшей к ГМС Новороссийск точки (*b*) и для точки вблизи Ростова-на-Дону (*c*)
F i g. 2. Wind roses constructed based on the data of the Novorossiysk hydro-meteorological station (*a*), the RegCM reanalysis for the point closest to the Novorossiysk station (*b*), and for the point close to Rostov-on-Don (*c*)

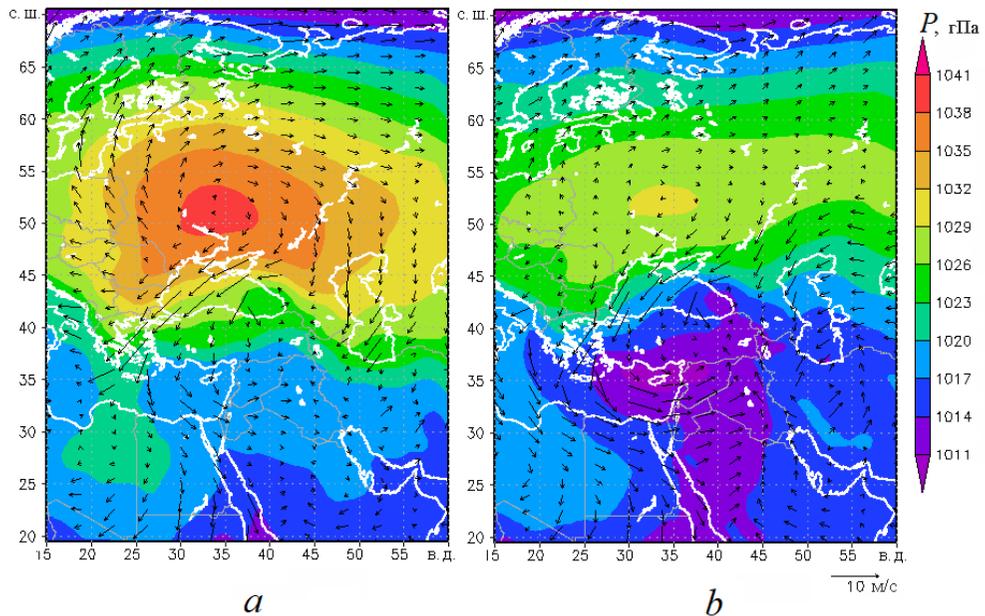
В Новороссийске преобладает северо-восточное направление ветра, включая кatabатический ветер с гор и боры. В предгорной части такого резкого преобладания нет, хотя ветры северо-восточного направления имеют наибольшую повторяемость. Отметим, что преобладание северо-восточных ветров характерно для всей северной части Черноморского региона [12], в предгорной части оно усиливается благодаря орографической окклюзии – эффекту обтекания северо-восточного края Кавказских гор. Различия в рис. 2, *a* и *b* связаны с недостаточным пространственным разрешением модели RegCM, не воспроизводящей мелкомасштабные пространственные особенности поля скорости ветра в боре. Кроме того, измерения направления ветра на ГМС даны с разрешением $22,5^\circ$.

Рассмотрим далее синоптические условия формирования ветров преобладающих восточного и северо-восточного направлений в области подветренного склона гор, хорошо представленного на розе ветров (рис. 2, *c*). Для этих целей построим композиты метеорологических полей, иллюстрирующие формирование масс холодного воздуха, вторгающегося с северо-востока в акваторию Черного моря в районе Новороссийска, при которых выполняются условия развития истинной боры, т. е. скорости ветра U не менее 15 м/с при отрицательной температуре T не более -5°C .

Методом кластерного анализа² (метод К-средних [13]) построим пространственные композиты, характеризующие типичные средние поля атмосферного давления и скорости ветра при боре. На рис. 3 показаны два главных пространственных кластера приземного давления и векторов скорости приземного ветра. Кластеры являются результатом выборочного осреднения тех 165 полей, для которых значения среднесуточных скоростей ветра и температуры новороссийской боры удовлетворяют указанным ограничениям. Поля выбраны согласно измерениям на ГМС Новороссийск из массива данных

² Электронный учебник по статистике. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html> (дата обращения: 02.08.2019).

реанализа *ERA-Interim* [9] за годы с 1979 по 2017. Визуальная оценка выбранных полей показала целесообразность разбиения на два кластера: результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о хорошем качестве кластеризации (Евклидово расстояние между кластерами и значения F -критерия достаточно велики, и уровень значимости параметров не превышает сотой доли процента). Были проведены также эксперименты с разбиением на три кластера и более, но их статистическая оценка показала уменьшение Евклидова расстояния между кластерами и значений F -критерия, что свидетельствует об ухудшении качества разбиения.



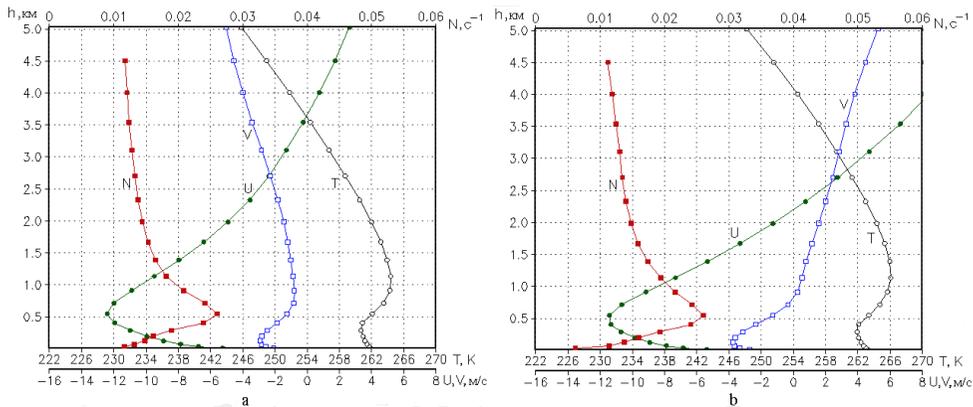
Р и с. 3. Композиты разделенных методом кластерного анализа полей приземного давления и скорости ветра для случаев боры (при $T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $U \geq 15\text{ м/с}$ по данным ГМС Новороссийск): *a* – первый кластер, *b* – второй кластер

F i g. 3. Composites of the surface pressure and wind speed fields separated by the cluster analysis method for the bora cases at $T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $U \geq 15\text{ м/с}$ based on the Novorossiysk hydrometeorological station: *a* – the first cluster, *b* – the second cluster

Основной элемент первого композита (рис. 3, *a*), усредняющий 102 случая боры при $T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $U \geq 15\text{ м/с}$, – антициклон с центром севернее Черного моря, на юго-восточной периферии которого формируется северо-восточный поток холодного воздуха с большими скоростями приповерхностного ветра. Второй композит (рис. 3, *b*) является результатом выборочного осреднения меньшего числа полей (63), соответствующих боре. Его основной элемент – южный циклон с центром в области Малой Азии. Этот композит также включает более слабый, по сравнению с первым композитом, северный антициклон с центром севернее Черного моря. На северо-восточной периферии циклона и юго-восточной периферии антициклона и формируется интенсивная истинная бора. Это бора фронтального типа наиболее повторяемая в холодный период года: рассмотренные 165 случаев истинной боры состави-

ли 85 % от общего числа случаев боры в эти месяцы без ограничения по минимальной температуре или 90 % от числа случаев боры с минимальной температурой $T_{\text{мин}} < -5$ °C и 100 % при $T_{\text{мин}} < -10$ °C.

Физические механизмы развития боры определяются вертикальной структурой скорости и температуры воздушного потока в области перед наветренным склоном гор, при переваливании через которые формируется бора. На рис. 4 показаны рассчитанные по модели реанализа *ERA-Interim* вертикальные профили температуры воздуха, компоненты скорости ветра и частоты плавучести. Профили построены по данным на модельных уровнях реанализа *ERA-Interim* [9], усредненным для первого (рис. 3, *a*) и второго (рис. 3, *b*) кластера боры.



Р и с. 4. Средние вертикальные профили температуры воздуха T , меридиональной U и зональной V компонент скорости ветра и частоты плавучести N в точке (45° с. ш.; 40° в. д.) по данным на модельных уровнях реанализа *ERA-Interim* [9] для первого (*a*) и второго (*b*) кластеров боры

F i g. 4. Average vertical profiles of the air temperature T , meridian U and zonal V components of the wind speed and the buoyancy frequency N in the point (45° N, 40° E) based on the data of the *ERA-Interim* reanalysis on the model levels [9] for the first (*a*) and the second (*b*) bora clusters

Как видно, в обоих случаях воздушный поток имеет вид интенсивного низкотропосферного течения воздуха со скоростями $\sim 10\text{--}15$ м/с, имеющего температурную инверсию на высотах $\sim 0,5\text{--}1$ км и, соответственно, максимум в профиле частоты плавучести N на высоте $\sim 0,5$ км, близкой к высоте горных хребтов. В обоих случаях на высотах до 1,5 км меридиональная скорость ветра достигала больших значений $\sim 10\text{--}15$ м/с, что являлось необходимым условием развития истинной боры [6]. Второе необходимое условие развития боры – сильная гидростатическая устойчивость воздушного потока в нижней части тропосферы [6].

Как следует из рис. 4, оценка значения числа Фруда в области высот, сравнимых с высотой горного хребта, составляет $Fr \approx 1\text{--}1,2$. Отметим, что это значение находится на границе двух режимов боры: мелкой, но более интенсивной боры при значениях $Fr < 1$ и высокой при $Fr > 1$ [14, 15]. Для первого режима важны эффекты блокирования потока над наветренным склоном гор, а также развитие критического слоя и турбулентной области над подветрен-

ным склоном. Мелкая бора носит характер струи воздуха, прилегающего к поверхности подветренного слоя. Для второго режима бора за подветренным склоном отрывается от поверхности склона и носит характер меандрирующего по высоте потока. Интересно отметить, что за время одного эпизода боры, продолжающегося 1–2 сут, эти два режима могут чередоваться в результате незначительных изменений скорости U и частоты плавучести N . Пример такого поведения новороссийской боры воспроизведен в работе [5].

Таким образом, на высотах до ~ 1 км различия в профилях температуры и скорости для двух кластеров, характеризующих осредненную синоптическую картину формирования истинной боры, малы. На больших высотах, как видно из рис. 4, проявляются отличия в профилях скорости, связанные с синоптическими особенностями полей скорости и давления, составляющих два кластера. В первом из них на периферии антициклона наблюдается увеличение направленной на юг компоненты меридиональной скорости. Во втором, где преобладает южный циклон, наоборот – с высотой увеличивается циклоническая компонента скорости.

Полученные пространственные поля двух преобладающих кластеров и соответствующие им вертикальные профили скорости и температуры являются результатом осреднения большого числа синоптических ситуаций боры. Выборочные поля для отдельных случаев боры в силу естественной синоптической изменчивости будут отличаться от них. Поэтому приведенные кластеры представляют первые два компонента разложения полей интенсивной боры за 1979–2017 гг. Отметим, что последующие кластеры для выбранной пространственной области и относительно небольшого числа случаев боры статистически незначимы и мы их не рассматриваем.

Заключение

По данным о скорости, направлении ветра и температуре воздуха, полученным на ГМС Новороссийск за продолжительный период времени 1901–2017 гг., оценены временные характеристики боры. Определено среднее количество суток с борой. Подсчитано, что на осенне-зимнее время года (с сентября по март) приходится около 76,4 % случаев боры, а на весенне-летнее (с апреля по август) – 23,6 %. Оценены повторяемость и среднее продолжительное время боры.

Основное внимание уделено случаям сильной, так называемой истинной, боры. Построена кумулятивная функция, и оценены параметры распределения Вейбулла для скорости ветра, даны оценки повторяемости боры с заданными скоростями в диапазоне отрицательных величин температур воздуха. Показано, что в холодный промежуток времени с декабря по март истинная бора является борой фронтального типа, развивающейся на периферии северного антициклона и южного циклона. Оценены пространственные структуры двух первых кластеров, выделенных в массиве данных, соответствующих случаям истинной боры.

Рассмотрена вертикальная структура полей скорости ветра, температуры и частоты плавучести в области перед наветренным склоном гор. Показано, что основной особенностью истинной боры является интенсивное низкотропосферное течение воздуха со скоростью 10–15 м/с, сопровождающееся ин-

версией температуры на высоте ~ 1 км и формированием нижележащего слоя устойчиво стратифицированного воздуха. Значение числа Фруда на высотах, сравнимых с высотой гор, равно ~ 1, т. е. находится в пограничной области, разделяющей гидродинамические режимы боры. Следствием этого является возможность развития новороссийской фронтальной боры двух видов – мелкой интенсивной приповерхностной струи воздуха либо приподнятого над поверхностью подветренного склона воздушного потока, испытывающего волновые колебания по вертикали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новороссийская бора / Отв. ред. А. М. Гусев. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 140 с. (Труды Морского гидрофизического института / АН СССР; Т. 14).
2. *Васильев А. А., Вильфанд Р. М., Голубев А. Д.* Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. М. : ГНИЦ РФ, 2016. Вып. 359. С. 48–57. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr359/vasiliev.pdf> (дата обращения: 20.03.2019).
3. *Гавриков А. В., Иванов А. Ю.* Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 5. С. 615–626. doi:10.7868/S0002351515050053
4. *Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А.* Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 5–20.
5. *Ефимов В. В., Барабанов В. С.* Моделирование новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 171–176.
6. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Сезонная изменчивость и гидродинамические режимы новоземельской боры // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 6. С. 684–698. doi:10.1134/S0002351518060056
7. *Анисимов А. Е., Яровая Д. А., Барабанов В. С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 4. С. 14–28. doi:10.22449/0233-7584-2015-4-14-28.
8. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
9. *Шаймарданов В. М.* Организация контроля качества информации, включаемой в фонд данных // Труды Главной геофизической обсерватории им А. И. Воейкова. СПб., 2011. Вып. 564. С. 166–177. <http://voeikovmgo.ru/download/564.pdf>
10. *Alpers W., Ivanov A., Horstmann J.* Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Monthly Weather Review. 2009. Vol. 137, no. 3. P. 1150–1161. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2563.1>
11. *Семенов Е. К., Соколичина Н. Н., Соколичина Е. В.* Синоптические условия формирования и развития новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 16–28.
12. *Hartigan J. A. Wong M. A.* Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28, no. 1. P. 100–108. doi:10.2307/234683014
13. *Smith R. B.* Hydrostatic airflow over mountains // Advances in Geophysics. 1989. Vol. 31. P. 1–41. doi:10.1016/S0065-2687(08)60052-7
14. Momentum Fluxes of Gravity Waves Generated by Variable Froude Number Flow over Three-Dimensional Obstacles / S. D. Eckermann [et al.] // Journal of the Atmospheric Sciences 2010. Vol. 67, no. 7. P. 2260–2278. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3375.1>

Об авторах:

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 6602381894**, vefim38@mail.ru

Комаровская Ольга Придиевна, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: G-1814-2019**, komarovskaya@mhi-ras.ru

Баянкина Татьяна Михайловна, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: G-2535-2019**, bayankina@mhi-ras.ru