

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):407—421.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.55(470.26)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421

О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области)

Надежда Вадимовна Двоглазова^{1, 2}, Борис Валентинович Чубаренко¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, chuboris@mail.ru

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, nadya2eyes@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены способы представления ряда векторных величин в виде одного вектора, характеризующего весь ряд: мода, результирующий и средний вектора, а также введенные в статье «репрезентативный» и «типичный» вектора. На примере данных о ветре в г. Балтийск при использовании критерия сонаправленности векторов показано, что каждый из способов подходит для решения определенных задач: результирующий или средний вектора — для характеристики переноса; мода, если применять ее оценку покомпонентно, может давать неоднозначный и непредставительный для всего ряда результат; «репрезентативный» и «типичный» вектора — лучше всего подходят для поиска вектора, наиболее характерного для ряда.

Ключевые слова: направление и скорость ветра, векторное осреднение, Балтика, Калининградская область.

Благодарности. Работа подготовлена в рамках выполнения темы № FMWE-2021-0012 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Авторы благодарят своего коллегу А. В. Килесо за полезные советы и содействие в практической части работы. Авторы также искренне благодарны двум анонимным рецензентам, привлеченным редакцией, за их критику и замечания, т. к. это позволило существенно улучшить содержание и стиль подачи материала.

Для цитирования: Двоглазова Н. В., Чубаренко Б. В. О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.

METEOROLOGY

Original article

On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast)

Nadezhda Vadimovna Dvoeglazova^{1, 2}, Boris Valentinovich Chubarenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, chuboris@mail.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, nadya2eyes@mail.ru

Summary. The paper discusses options for representing a series of vectors as a unit vector that describes the entire series as a whole. The following options were studied: the “mode”, “progressive” and “average”

vectors, as well as the “representative” and “typical” vectors introduced in the paper. The example of wind data in the town of Baltiysk for the period 1 January 2022 — 2 February 2022 was used. The criterion of co-direction of vectors based on maximum scalar product of vectors was introduced to compare the mentioned above options. A numerical comparison of the results (the value of criterion) allowed to reveal the difference between all the considered options and the possibility for them to be applied for a certain class of physical problems. The methods for calculating the “representative” and “typical” vector appeared to be the best to characterize the vector series. To optimally represent the series by one vector included in the series, a “typical” vector should be used. “Progressive” or “average” vectors characterize the transport problem. The “mode” when used separately for direction and velocity often gives ambiguous result, being unrepresentative for the entire series.

Keywords: wind direction and speed, vector’ averaging, Baltic, Kaliningrad Oblast.

Acknowledgments. The work has been prepared within the theme FMWE-2021-0012 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The authors are grateful to their colleague Alexander Kileso for the useful advice and assistance in the practical part of the study. The authors are also sincerely grateful to two anonymous reviewers involved by the editors for their criticism and comments, as it allowed to improve significantly the content and style of presentation of the material.

For citation: Dvoeglazova N. V., Chubarenko B. V. On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):407—421. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.

Введение

Многие физические величины в метеорологии или океанологии являются векторными. Например, скорости течения в какой-то точке природного водоема или скорости ветра в какой-то точке над поверхностью воды или суши. При рассмотрении временной серии такой величины для некоторого отрезка времени (обычно рассматриваются серии с фиксированным шагом по времени) возникает необходимость описания такой упорядоченной группы векторных величин (т. е. выборки векторов) какой-то единой характеристикой по аналогии со стандартными статистиками для скалярных величин (среднее, мода и пр.) [1, 2].

Основные расчетные методики осреднения величин геофизических характеристик подробно описаны в [2, 3], где отдельные разделы посвящены обработке векторных величин, но не всегда обсуждается самый первый шаг — поиск среднего или характерного значения векторной величины на определенном временном интервале.

Для стандартных метеорологических наблюдений автоматически делается осреднение показаний по направлению и скорости ветра за 10 мин, предшествующих сроку наблюдения (<http://method.meteorf.ru/ansambl/pojasnenijaansambl.html> и [4, 5]). Осреднение для характеристик ветра всегда применяется в измерительных приборах, где шаг считывания измеряемых характеристик составляет доли секунды, а формируемый на базе скользящего осреднения ряд (<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725075.htm>) стандартно имеет шаг 2 мин. В отдельных инициативных разработках (<https://habr.com/ru/post/423243/>) применяется векторное осреднение для всех зафиксированных за 2 мин значений скорости ветра.

Если применять аналогичный подход для более длительных интервалов времени (например, сутки), то можно получить парадоксальный результат, когда векторное осреднение может дать близкую к нулю скорость ветра, в то время как в течение дня ветер все время был достаточно интенсивный, и дать направление

ветра, которое вообще не реализовывалось в течение дня. То есть в результате попытки такого сжатия информации и замены суточного ряда векторов ветра одной характеристикой, получается полная потеря информации, т. к. результат не представителен для всего ряда.

Целью работы является сравнительный анализ вариантов представления выборки векторов (на примере данных о ветре) в виде одного вектора, описывающего всю выборку в целом. Это важно, например, для решения практического вопроса — как наиболее правдоподобно единой величиной описать ветровую ситуацию для суток, недели и месяца, имея исходные данные стандартных метеорологических наблюдений (4 или 8 раз в сутки).

Настоящая работа не претендует на новый в векторной алгебре результат, базируется на известных подходах, не ставит целью дополнение существующих в метеорологии стандартов (отечественных и международных). Она предназначена больше для практиков, организующих так называемые волонтерские измерения на уровне школ, кружков, музеев¹ и пр., а также и коллегам, сталкивающимся с аналогичной проблемой — как описать ветер на временном интервале с помощью одной (векторной) величины.

Исходные данные и методика их обработки

Все обсуждения приведены применительно к данным о ветре, полученным за стандартные сроки наблюдений (8 сроков в сутки) безотносительно к тому, что эти данные также рассчитаны простым осреднением данных прямых инструментальных измерений за более короткие интервалы времени (10 мин). Основным источником данных — сайт gr5.ru с данными лицензированной гидрометеорологической кампании (ООО) «Расписание Погоды» (Санкт-Петербург, Россия), который содержит данные о фактической погоде, наблюдаемой на наземных станциях с 2004 г. Данные наблюдений поступают на сайт восемь раз в сутки, через каждые три часа: как правило, к 0:30, 3:30, 6:30, 9:30, 12:30, 15:30, 18:30 и 21:30 UTC [6].

Задание векторов ветра в системах координат

Исходные данные для вектора ветра задаются в виде длины и направления. За длину вектора принимается его скорость (в м/с). Направление определяется согласно румбу [3, 5], то есть углу, который образуется вектором скорости ветра и меридианом (север принимается за 360° или 0° , восток за 90° , юг — за 180° , запад — за 270°) [3]. Направление ветра традиционно [7, 8] представляется в форме «откуда дует» или «в компас»² (рис. 1 а), характеризуется углом γ_{wind} ,

¹ Именно с этой целевой аудиторией связаны, возможно, излишне подробные пояснения и формулы, которые могут показаться очевидными.

² В гидрологии вектор скорости течения, наоборот, традиционно задается (как и в математике) направленным отрезком, откладываемым от начала координат, т. е. «из компаса» (рис. 1 а, вектор изображен пунктиром), но направление по-прежнему отсчитывается (как и азимут) в градусах, по часовой стрелке от направления на север (в пределах от 0° до 360° , северному направлению приписывается значение 0°).

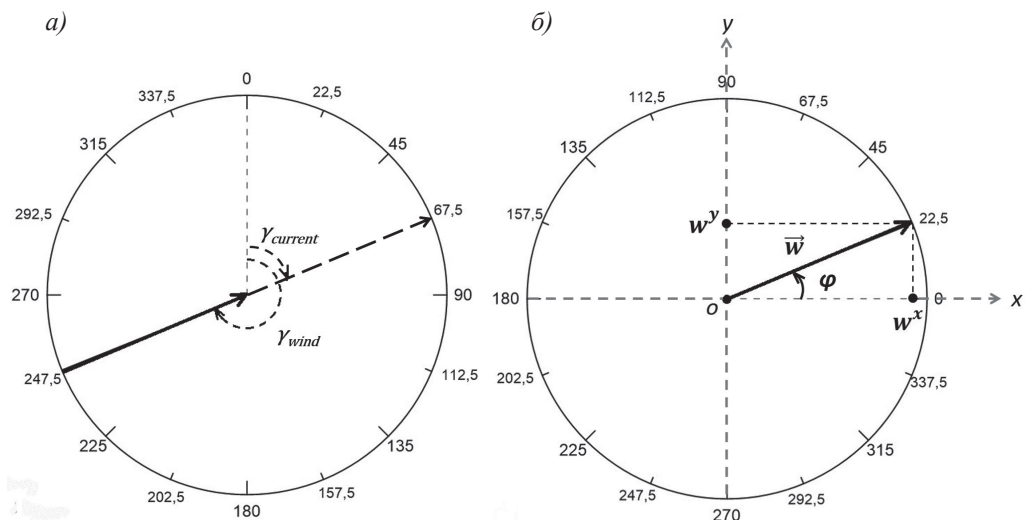


Рис. 1. Геометрическое представление:

a) ветра, дующего с запада-юго-запада (направление — γ_{wind}) (ЗЮЗ ветер, сплошная стрелка) и направления течения ($\gamma_{current}$) (БСВ течение, пунктирная стрелка), отсчитываемых от северного направления; *б)* вектора \vec{w} в ортогональной системе координат, соответствующему и ветру, дующему с запада-юго-запада, и течению, направленному на восток-северо-восток, угол φ отсчитывается против часовой стрелки от оси Ox , (w^x ; w^y) — компоненты вектора в этой системе координат.

Fig. 1. Geometrical representation of:

a) the wind blowing from the west-south-west (direction of γ_{wind}) (WSW wind, solid arrow) and direction of current ($\gamma_{current}$) (ENW current, dotted arrow) counted from the north direction; *б)* the vector \vec{w} in the orthogonal system coordinates represents the wind blowing from the west-southwest and current directed to the east-northeast, the angle φ is measured counterclockwise from the Ox axis, (w^x ; w^y) — vector's components in this coordinate system.

отсчитываемым в градусах по часовой стрелке от направления на север (в пределах от 0° до 360° , а северному направлению приписывается значение 0°). Например, западно-юго-западный ветер дует с запада-юго-запада на восток-северо-восток, поэтому угол равен $247,5^\circ$.

Для применения любых математических формул векторной алгебры необходим перевод векторов ветра или течений в привычную ортогональную систему координат, в которой вектор откладывается от начала координат, а его направление задается углом φ , измеряемом в радианах и отсчитываемом от положительного направления оси Ox в сторону положительного направления оси Oy (рис. 1 б).

Связь между углами (в градусах) задается формулами (1) и (2):

$$\varphi = 90^\circ - (\gamma_{wind} - 180^\circ) = 270^\circ - \gamma_{wind}, \quad (1)$$

$$\varphi = 90^\circ - \gamma_{current}, \quad (2)$$

где γ_{wind} и $\gamma_{current}$ — углы, отсчитываемые от северного направления; φ — угол, отсчитываемый от положительного направления оси Ox .

Проекции (координаты) вектора в ортогональной системе координат (w^x, w^y) вычисляются по формулам (3)—(4) и представляют собой произведение длины вектора (его модуля) на косинус / синус¹ угла φ :

$$w^x = w \cdot \cos(\varphi), \quad (3)$$

$$w^y = w \cdot \sin(\varphi), \quad (4)$$

где w — длина вектора (например, скорость ветра в м/с); φ — угол между направлением вектора и направлением оси ОХ; w^x и w^y — проекции вектора w на ось ОХ и ОУ.

В случае обратного преобразования, когда известны его проекции, модуль вектора рассчитывается по теореме Пифагора (квадратный корень из суммы квадратов проекций), а вычисление значения угла выполняется через функцию арктангенс для этих величин (w^x, w^y). При отрицательном значении угла, полученном при применении функции арктангенс, к полученному значению угла нужно прибавить 360° .

Характерные значения вектора ветра на временном интервале

Для поиска наиболее характерного значения вектора ветра на временном интервале, например, за сутки или несколько суток, могут быть использованы различные подходы.

Мода. В качестве такого характерного значения может использоваться обыкновенная мода, соответствующая алгоритму расчета моды в математической статистике для скалярных величин [2], которая описывает наиболее вероятное значение из группы. Соответственно, вектор, характеризующий моду из группы векторов, имеет координаты, вычисляемые по принципу наиболее часто повторяющегося значения (или, что то же самое – наибольшей продолжительности для ряда регулярных значений, заданных с некоторым интервалом времени) – отдельно для скорости ветра и для его направления.

Результирующий вектор — вектор, являющийся результатом векторного сложения всех векторов группы. Методика его расчета заключается в вычислении алгебраических проекций (рис. 2) векторов заданного ряда на оси ОХ и ОУ ортогональной системы координат. Суммарные величине полученных проекций и будут представлять собой проекции результирующего вектора на оси координат (например, в случае восьми векторов ветра за сутки):

$$W^x = w_1^x + w_2^x \dots + w_8^x,$$

$$W^y = w_1^y + w_2^y \dots + w_8^y, \quad (5)$$

где W^x — проекция результирующего вектора на ось ОХ; w_i^x — значение проекций отдельных векторов на ось ОХ ($i = 1 \div 8$); W^y — проекция результирующего вектора на ось у ОУ; w_i^y — значение проекций отдельных векторов на ось ОУ ($i = 1 \div 8$).

Средний вектор вычисляется делением значения результирующего вектора на количество векторов в исходной группе (6):

¹ Для применения формул в Excel полученное значение угла φ нужно не забыть перевести в радианы.

$$W_{cp}^x = \frac{w_1^x + w_2^x \dots + w_8^x}{n},$$

$$W_{cp}^y = \frac{w_1^y + w_2^y \dots + w_8^y}{n}, \tag{6}$$

где W_{cp}^x и W_{cp}^y — проекции среднего вектора на ось ОХ и ОУ, w_i^x и w_i^y — аналогично (5). Средний и результирующий вектора совпадают по направлению, причем, это направление может не встречаться в группе исходных векторов.

«Репрезентативным» вектором назовем такой, который имеет направление результирующего (или среднего) вектора, но его абсолютная величина равна арифметическому среднему абсолютных величин (модулей) всех векторов в группе, то есть модуль принимается равным среднему значению модуля векторов выборки:

$$v_{cp} = \frac{v_1 + v_2 \dots + v_n}{n}, \tag{7}$$

где v_{cp} — значение средней скорости ветра (м/с); v_1, v_2 и т.д. — значения скорости ветра в стандартные сроки (м/с); n — количество значений (равно 8 в случае для суточной средней скорости и стандартных сроков наблюдений каждые 3 часа).

«Типичным» вектором будем считать такой вектор, модуль которого принимается равным среднему арифметическому значению для модулей всех векторов

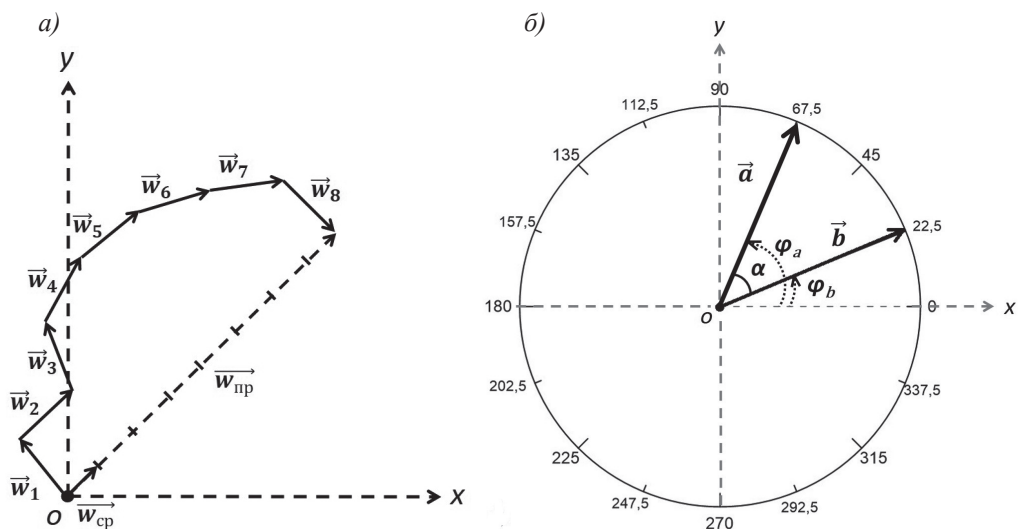


Рис. 2. Результирующий ($\overline{w_{np}}$) и средний ($\overline{w_{cp}}$) вектора (а), графическое представление элементов для расчета скалярного произведения (б).

Fig. 2. Progressive ($\overline{w_{np}}$) and average ($\overline{w_{cp}}$) vectors (а), graphical representation of elements for calculating the scalar product (б).

выборки, т. е. согласно (7), а его направление — это направление как минимум одного вектора из представленной выборки. Но как из группы векторов выбрать вектор, который наиболее сонаправлен всем остальным?

Для поиска направления такого «типичного» вектора (т. е. типичного среди исходных) используем свойство скалярного произведения двух векторов — чем более они сонаправлены, тем больше величина скалярного произведения единичных векторов, имеющих то же направление. Детали представлены в следующем разделе.

Критерий сонаправленности векторов

Предлагается применить *критерий сонаправленности векторов*, величина которого равна максимуму суммы попарных скалярных произведений. Поскольку речь идет о направлениях, то скалярно перемножаются единичные вектора, соответствующие направлениям векторов выборки.

Первым этапом является расчет по формуле (8) попарных скалярных произведений единичных векторов, произведения которых равны косинусам углов α (рис. 2 б) между этими векторами:

$$P_{ab} = \cos \alpha = \cos(\varphi_b - \varphi_a), \quad (8)$$

где P_{ab} — значение скалярного произведения двух векторов (рис. 2 б); φ_a и φ_b — направление этих векторов в ортогональной системе координат, причем порядок не важен, т. к. функция косинуса — четная функция.

В результате получается набор скалярных величин в диапазоне $[-1, 1]$, который может быть представлен в виде таблицы, симметричной относительно главной диагонали (табл. 1). Складывая полученные величины, например, по столбцам, получаем их суммы (в диапазоне $[-8, 8]$ в случае восьми векторов в выборке), характеризующие сонаправленность вектора данного направления с остальными векторами.

Таблица 1

Пример применения методики расчета «типичного» вектора для восьми векторов ветра, измеренных каждые 3 часа в интервале 02:00—23:00

An example of the application of the methodology for calculating the “typical” vector for 8 wind vectors measured every 3 hours in the interval 02:00—23:00

Время		2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
	Направление ветра, рад.	0	0	0	0	0,393	0,785	0,785	0,393
2:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
5:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
8:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
11:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
14:00	0,393	0,92	0,92	0,92	0,92	1,00	0,92	0,92	1,00
17:00	0,785	0,71	0,71	0,71	0,71	0,92	1,00	1,00	0,92

Время	Направление ветра, рад.	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
			0	0	0	0	0,393	0,785	0,785
20:00	0,785	0,71	0,71	0,71	0,71	0,92	1,00	1,00	0,92
23:00	0,393	0,92	0,92	0,92	0,92	1,00	0,92	0,92	1,00
	Сумма	7,26	7,26	7,26	7,26	7,54	6,68	6,68	7,54

Максимальная сумма по столбцу будет у того вектора, направление которого является наиболее близким ко всем остальным векторам в анализируемой выборке. Согласно примеру (табл. 1), таким «типичным» направлением ветра среди восьми измерений, полученных в течение суток, является направление 0,393 рад. (22,5°, согласно математической системе координат, и 67,5°, согласно географической системе), зафиксированное дважды за сутки: в 14:00 и в 23:00.

Представленный пример показал, что применение этого критерия может давать неоднозначный результат.

Результаты

Результаты применения изложенных методов даны на примере данных для пункта Балтийск в Калининградской области. Взят период¹ 01.01.2022 г. — 02.02.2022 г. (рисунки 3—6), характеризующийся сильной штормовой активностью (порывы до 26 м/с). В рамках этого периода были выбраны две даты (14 и 30.01.2022 г.), в которые ветер оставался достаточно сильным и менялся в пределах 45—67,5° (рис. 4). Также отдельно анализировались недельные серии, содержащие эти даты (11—17.01.2022 г. и 27.01—02.02.2022 г.) (рис. 5), а также весь месяц в целом (01.01.2022 г. — 02.02.2022 г.) (рис. 6).

Значения характерных векторов (мода, средний вектор, «репрезентативный», «типичный» вектора) были рассчитаны для каждого дня периода 01.01.22—02.02.22 (обозначены соответственно 1, 2, 3, 4 на рисунках 4—6). То, насколько полученные характерные вектора представительны для выборки за соответствующий период, оценивалось визуально (рисунки 4—6) и на основе числового критерия сонаправленности векторов (максимума скалярного произведения, раздел «Критерий сонаправленности векторов»).

Критерий сонаправленности (в одноименном разделе) оценивался с точностью до сотых (табл. 2), т. к. степень округления величин критерия для маленькой выборки должна быть выбрана такой, чтобы величины критерия различались, и можно было однозначно выбрать преимущественное направление.

Пример двух суток с максимальными ветрами (14.01.2022 г. и 30.01.2022 г.) показал (рис. 4), что усреднение по принципу моды выбирает крайние вектора из выборки, явно ее не характеризующие, и дает неоднозначный результат (рис. 4, табл. 2).

¹ Авторы уверены, что полученные для такого ряда оценки уже иллюстрируют общие тенденции, хотя, конечно, их следует проверить на других выборках (другие даты, другие сезоны и пр.).



Рис. 3. Ветер в период с 01.01.2022 г. по 02.02.2022 г. в г. Балтийске (Калининградская обл.).

Fig. 3. Wind for the period 01.01.2022 — 02.02.2022 in Baltiysk (Kaliningrad Oblast).

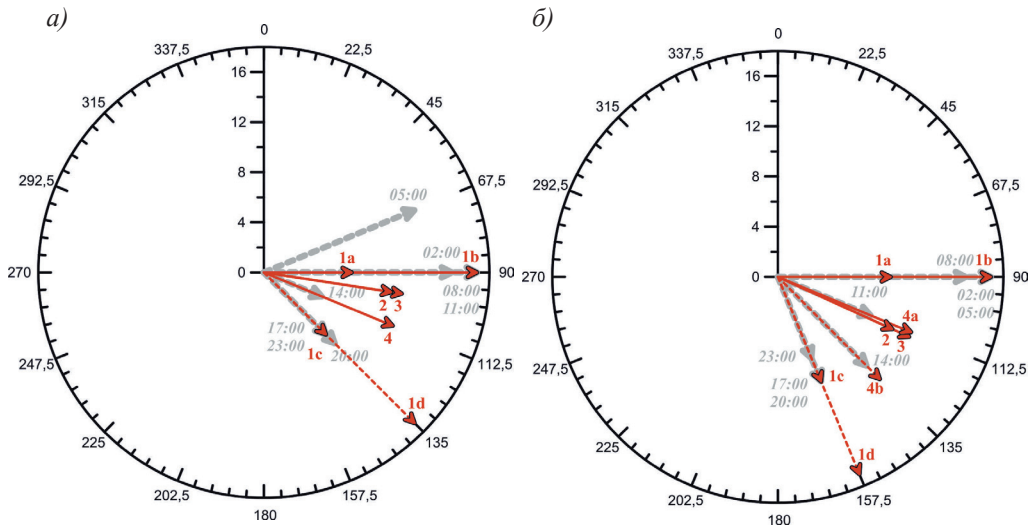


Рис. 4. Графическое изображение суточной ветровой активности 14.01.2022 г. (а) и 30.01.2022 г. (б):

исходные измерения (8 раз в сутки, местное время указано для иллюстрации повторяющихся значений) — серым цветом, мода (1a, 1b, 1c, 1d), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4, 4a, 4b).

Fig. 4. Graphical representation of daily wind activity on 01.14.2022 (a) and 01.30.2022 (b):

original measurements (8 times a day, local time is provided to illustrate repetitive values) — in gray, mode (1a, 1b, 1c, 1d), average (2), “representative” (3) and “typical” (4, 4a, 4b).

Оказалось, что «репрезентативный» вектор по модулю всегда больше, чем средний (рисунки 4—6), и визуально более точно представляет модули векторов совокупности. Что касается направления этих векторов (которые совпадают по методике расчета), то, как показал этот пример, оно находится в самой «гуще» пучка исходных векторов, т. е. хорошо описывает множество имеющихся векторов.

Таблица 2

Суммарные значения парных скалярных произведений для характерных векторов (мода, средний, «репрезентативный» и «типичный») для 01.01.2022—02.02.2022

Total values of paired scalar products between the characteristics vectors (mode, average, progressive, “representative” and “typical”) for 01.01.2022 to 02.02.2022

Дата	Мода*		Средний / «репрезентативный»	«Типичный»
01.01.2022	3,69	5,32	5,34**	5,32
02.01.2022	6,54	6,54	6,84	6,89
03.01.2022	7,01	7,01	7,30	7,25
04.01.2022	7,70	7,70	7,84	7,70
05.01.2022	7,26	7,26	7,28	7,26
06.01.2022	6,85	6,85	6,74	6,85
07.01.2022	5,72	5,72	6,82	6,68
08.01.2022	7,92	7,92	7,93	7,92
09.01.2022	3,41	6,13	5,95	6,17
10.01.2022	7,48	7,48	7,56	7,48
11.01.2022	7,34	7,34	7,10	7,34
12.01.2022	6,26	6,26	6,84	7,00
13.01.2022	7,41	7,41	7,54	7,41
14.01.2022	6,43	6,97	7,21	7,25
15.01.2022	7,40	7,40	7,44	7,40
16.01.2022	7,23	7,23	7,42	7,33
17.01.2022	5,77	6,48	6,36	6,48
18.01.2022	5,32	5,32	6,35	6,28
19.01.2022	7,48	7,48	7,56	7,48
20.01.2022	5,55	5,55	6,45	6,40
21.01.2022	7,77	7,77	7,86	7,77
22.01.2022	6,48	6,48	6,49	6,48
23.01.2022	2,41	3,25	3,25	3,25
24.01.2022	7,48	7,48	7,47	7,48
25.01.2022	4,72	6,03	6,31	6,57
26.01.2022	6,86	6,86	6,84	6,86
27.01.2022	6,50	6,50	7,18	6,75
28.01.2022	5,63	5,63	5,94	6,00
29.01.2022	5,85	5,85	5,91	5,85
30.01.2022	5,78	5,78	6,86	6,82
31.01.2022	7,70	7,70	7,85	7,70

Окончание табл. 2

Дата	Мода*		Средний / «репрезентативный»	«Типичный»
01.02.2022	2,23	2,23	4,72	4,59
02.02.2022	4,47	4,47	4,75	4,86
Сумма за весь период с 01.01—02.02.2022 г.	203,67	211,41	221,28	220,86
Сумма за 11—17.01.2022 г.	47,85	48,39	49,90	50,21
Сумма за 27.01—02.02.2022 г.	38,16	38,16	43,21	42,57

* Поскольку оценка критерия для моды не всегда дает единственное значение, указаны минимальное и максимальное из полученных.

** Жирным шрифтом выделены максимальные значения критерия сонаправленности векторов для данных суток.

Заливка серым — случаи, когда алгоритм поиска дал два вектора с одним и тем же значением критерия.

Метод расчета «типичного» вектора может давать неоднозначный результат: два вектора из группы могут иметь направления, для которых значение критерия сонаправленности будет максимальным (например, 04, 18, 30 и 31.01.2022 г., табл. 2). Поскольку эти направления, «равные» с точки зрения критерия сонаправленности, всегда будут на соседних румбах, то избавиться от полученной неоднозначности можно путем расчета среднего направления между ними. Значение критерия для этого направления станет наибольшим. Такое среднее направление повышает значение критерия для четырех перечисленных выше неоднозначных случаев: с 7,70 до 7,85 (04.01.2022), с 6,28 до 6,40 (18.01.2022), с 6,82 до 6,95 (30.01.2022) и с 7,70 до 7,85 (31.01.2022). Во всех четырех случаях критерий становится наибольшим в сравнении с остальными методами, а, следовательно, наиболее близко характеризующим вектора выборки. Но такое среднее направление уже становится расчетным, т. к. не присутствует в выборке.

Направление «типичного» вектора, как наилучшего среди имеющихся (а не расчетных) направлений, оказывается наиболее близким к направлению среднего / «репрезентативного» вектора.

Как для суточного, так и недельного периодов лучшими (согласно критерию сонаправленности векторов) оказывались направления либо среднего / «репрезентативного» вектора, либо «типичного» векторов. Например, для периода 11—17.01.2022 г. (рис. 5 а) максимальный суммарный критерий получился для «типичного» вектора, а для периода 27.01—02.02.2022 г. (рис. 5 б) — для среднего / «репрезентативного» вектора. Нужно сказать, что величины критерия для этих векторов в каждую неделю отличались незначительно (на 0,31—0,34 при округлении до сотых), но направления различались на угловую меру в пределах одного румба (рис. 5).

В целом за анализируемый период 01.01.2022 г. — 02.02.2022 г. максимальная величина суммарного критерия сонаправленности (табл. 2) получена для среднего / «репрезентативного» вектора (в 20-ти днях из 33-х). В остальных 12-ти днях — для «типичного» вектора. Из них лишь для пяти дней значения критерия совпадают с его значением для моды.

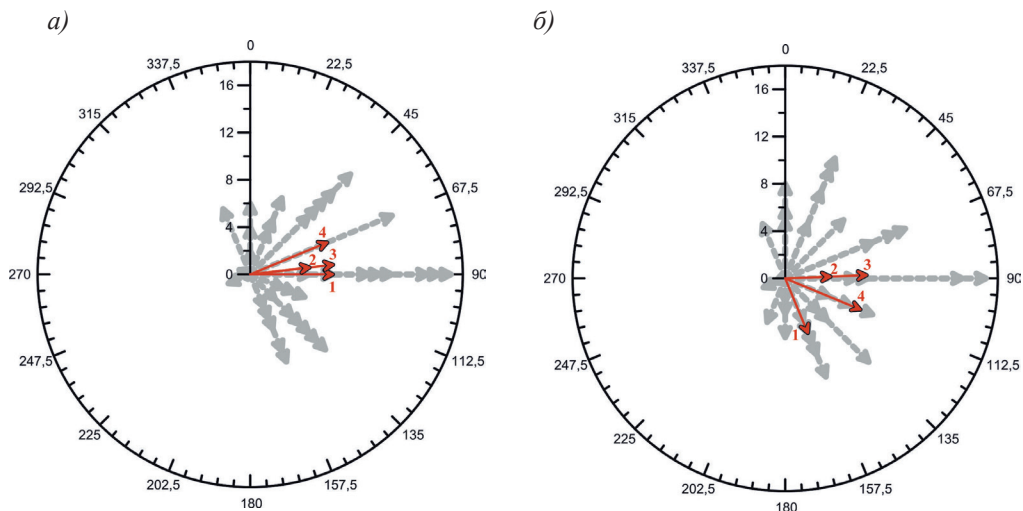


Рис. 5. Графическое изображение семидневной ветровой активности с 11 по 17.01.2022 г. (а) и с 27 января по 02 февраля 2022 г. (б):

исходные измерения (восемь раз в сутки, местное время для повторяющихся значений не указано, т. к. таковых слишком много) — серым цветом, мода (1), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4).

Fig. 5. Graphical representation of the seven-day wind activity from 01.11.2022 to 01.17.2022 (a) and from 01.27.2022 to 02.02.2022 (б): original measurements (8 times a day, local time is not specified for duplicate values, because too many of those) — in gray, mode (1), average (2), “representative” (3), “typical” (4).

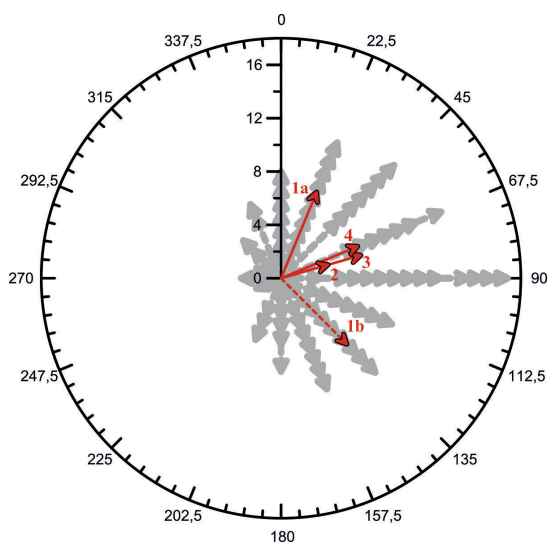


Рис. 6. Графическое представление векторов ветра, фиксируемых в течение месяца (с 1 января по 02 февраля 2022 г.): мода (1а, 1б), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4).

Fig. 6. Graphical representation of wind vectors recorded during the month (from 01.01.2022 to 02.02.2022): mode (1a, 1b), average (2), “representative” (3), “typical” (4).

Обсуждение

Каждый из подходов для поиска характерного вектора для набора векторов (мода, средний вектор, «репрезентативный», «типичный» вектора) характеризуется своими плюсами и минусами.

Мода. Так как мода описывает наиболее часто встречающееся значение¹ (т. е. наиболее вероятное из представленных) из ряда скалярных величин, она может быть применима отдельно к величинам модуля вектора скорости и его направления. Естественно, нужно принимать во внимание количество членов ряда и подчиненность их значений нормальному распределению, чтобы получить статистически значимый результат (моду для восьми значений ветра в день технически выделить можно, но она не имеет статистического смысла). Вектор, для которого направление и величина являются отдельно модами для выборок направлений и скоростей не может быть «реальным» и, следовательно, трактоваться как представительный для данной выборки векторов.

Результирующий вектор дает информацию о «переносе» в результате реализации всей группы векторов. Он не характеризует индивидуальные вектора, присутствующие в выборке (вероятность того, что он может встретиться в имеющейся выборке, крайне мала), а характеризует всю группу в целом.

В результате расчета *среднего* вектора получается вектор, имеющий смысл математического среднего (векторное осреднение). Его направление совпадает с направлением результирующего вектора. Но основной недостаток заключается в том, что полученный средний вектор слабо соотносится с каждым из векторов выборки (зачастую не совпадает по направлению и по величине ни с одним из векторов группы).

Абсолютная величина *«репрезентативного»* вектора равна арифметическому среднему абсолютных модулей всех векторов в группе, что делает вектор более объективным (в отличие от результирующего и среднего векторов) с точки зрения представления модулей всех векторов выборки. К недостатку можно отнести то, что его направление в общем случае не совпадает ни с одним направлением, встречающимся в выборке (как и в случае с результирующим и средним векторами).

«Типичный» вектор. В качестве модуля для него используется среднее арифметическое из всех модулей векторов выборки, что делает его вполне представительным. Согласно методике расчета направление «типичного» вектора — это направление одного из векторов, присутствующих в выборке. Того, который наиболее «сонаправлен» со всеми векторами в выборке. То есть «типичный» вектор расположен в самой середине «пучка» всех векторов выборки. Выяснилось, что результат применения критерия сонаправленности векторов может дать два (и более) направления, в равной степени «сонаправленных» со всеми векторами выборки. Избавиться от неоднозначности можно расчетом среднего между этими направлениями.

¹ Следует иметь в виду, что значение моды для ряда, в котором какие-то значения не повторяются, не имеет смысла. Для выборки значений ветра за сутки (8 значений за сутки, 8 или 16 возможных румбов) такое вполне может быть.

Нами фактически рассмотрены разные комбинации схожих подходов в определении характерных направлений и модулей. Направления результирующего, среднего и «репрезентативного» векторов, а также модули для «репрезентативного» и «типичного» векторов — вычисляются одинаково.

Заключение

Результат применения моды для векторных характеристик нельзя назвать удачным, так как он может давать неоднозначный результат, величины которого могут сильно отличаться. Кроме того, в результате применения критерия сонаправленности векторов вектор-мода оказался в меньшей степени сонаправленным с реальными значениями ряда.

Результирующий и средний за любой период (масштаб «осреднения») вектор хорошо описывает процесс в целом, если только речь идет о задаче переноса, но не дает возможности получить вектор, характерный для всей выборки, т. е. совокупно характеризующий вектора, имеющиеся в выборке.

«Репрезентативный» вектор однозначно и хорошо (согласно критерию сонаправленности векторов) описывает направление и величины всего набора векторов в выборке.

«Типичный» вектор по определению имеет направление одного из векторов, присутствующих в выборке. Он также хорошо описывает направление и величины векторов в выборке. Критерий сонаправленности при этом может быть немного меньше, чем для среднего / «репрезентативного» вектора.

Проблемой может быть неоднозначность, когда «типичными» направлениями являются несколько направлений, встречающихся в выборке и доставляющих максимум критерию сонаправленности векторов. Избавиться от неоднозначности следует расчетом среднего между этими «типичными» направлениями. И такой «однозначно типичный» вектор уже доставляет абсолютный максимум критерию сонаправленности.

Именно методы расчета «представительного» и «типичного» векторов позволяют получить вектор, который может интегрально отразить группу векторов, т. е. максимально представить те направления и модули векторов, которые встречались в выборке.

Список источников

1. Балинова В. С. Статистика в вопросах и ответах: учеб. пособие. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2004. 344 с.
2. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
3. Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. СПб.: РГГМУ, 1992. 96 с.
4. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.
5. Иванов В. А., Москальченко С. А. Метеорология и климатология: лаб. практикум для студентов. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. 110 с.
6. «Расписание погоды»: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rp5.ru> (дата обращения: 25.05.2022).

7. Полякова Л. С., Кашарин Д. В. Метеорология и климатология. Учебное пособие. Новочеркасск: НГМА, 2004. 107 с.
8. Васильев К. П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состоянии моря. Л.: Гидрометиздат, 1980. 230 с.

References

1. Balinova V. S. *Statistika v voprosah i otvetah: ucheb. posobie = Statistics in questions and answers: Study guide*. Moscow: Prospect, 2004: 344 p. (In Russ.).
2. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii. Uchebnik = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information. Study guide*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
3. Vainovsky P. A., Malinin V. N. *Metody obrabotki i analiza okeanologicheskoy informacii. Mnogomernyy analiz = Methods of processing and analysis of oceanological information. Multidimensional analysis*. St Petersburg: RSHU, 1992: 96 p. (In Russ.).
4. Khromov S. P., Mamontova L. I. *Meteorologicheskij slovar' = Meteorological dictionary*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974: 568 p. (In Russ.).
5. Ivanov V. A., Moskalchenko S. A. *Meteorologiya i klimatologiya: lab. praktikum dlia studentov = Meteorology and climatology: study guide for students*. Krasnoyarsk: Reshetnev SibGU, 2004: 110 p. (In Russ.).
6. «Raspisanie pogody» = «Weather schedule»: [Electronic resource]. Available at: <http://www.rp5.ru> (accessed 25.05.2022). (In Russ.).
7. Polyakova L. S., Kasharin D. V. *Meteorologiya i klimatologiya. Uchebnoe posobie = Meteorology and climatology. Study guide*. Novocherkassk: NGMA, 2004: 107 p. (In Russ.).
8. Vasiliev K. P. *Chto dolzhen znat' sudovoditel' o kartakh pogody i sostoyanii moray = What a boatmaster should know about weather maps and the state of the sea*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 230 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Двоеглазова Надежда Вадимовна, аспирант Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград); лаборант, лаборатория прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), nadya2eyes@mail.ru.

Чубаренко Борис Валентинович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва); chuboris@mail.ru.

Information about authors

Nadezhda V. Dvodeglazova, PhD student of Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad), assistant of the Laboratory of Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow), nadya2eyes@mail.ru.

Boris V. Chubarenko, PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow), chuboris@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 02.06.2022.

Принята к публикации после доработки 30.08.2022.

The article was received on 02.06.2022.

The article was accepted after revision on 30.08.2022.