

ИЗМЕНЕНИЯ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ
И ЕГО ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫИ. С. ДАНИЛОВИЧ^{1), 2)}, И. В. КОСТЮЧЕНКО²⁾¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси,
ул. Франциска Скорины, 10, 220114, г. Минск, Беларусь²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования динамики скорости ветра в Атлантико-Европейском секторе и более детально на территории Беларуси. Показано, что снижение скорости ветра на территории страны с 1970-х гг., выявленное в работах белорусских исследователей, было синхронизировано с ослаблением ветров на большей части Европейского континента. Однако с 2010 г. наметилась тенденция увеличения скорости ветра на большинстве станций страны. Даны подтверждения, что выявленная тенденция соответствует ситуации на большей части Европы. Кроме того, тенденции изменения скорости ветра коррелируют с преобладающей фазой Северо-Атлантического колебания. Подобные изменения в динамике ветра могут быть связаны с природными факторами, такими как изменения циркуляционных условий, а также с техническими факторами. С помощью пяти статистических тестов (стандартный нормальный тест для проверки однородности, непараметрический тест Петтитта, Q-тест Буишанда, тест дальности Буишанда и тест отношения правдоподобия Буишанда) определено индивидуально по каждой метеорологической станции наличие нарушений в рядах средней годовой скорости ветра и межгодовой изменчивости. Проанализированы сведения из истории метеорологических станций о переносе метеорологических площадок, изменении закрытости горизонта и замене ветроизмерительных приборов. Проведенный анализ позволил определить станции, на которых снижение или увеличение скорости ветра может быть связано с техническим воздействием на характеристики ветра.

Ключевые слова: скорость ветра; межгодовая изменчивость; ветровой режим; однородность рядов; защищенность метеорологической площадки; перенос метеорологической площадки; ветроизмерительный прибор.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X23РНФ-122).

Образец цитирования:

Данилович ИС, Костюченко ИВ. Изменения ветрового режима на территории Беларуси и его возможные причины. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;2:51–61.
EDN: NVNACG

For citation:

Danilovich IS, Kostyuchenko IV. Changes in wind regime across the territory of Belarus and its possible causes. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;2:51–61. Russian.
EDN: NVNACG

Авторы:

Ирина Сергеевна Данилович – кандидат географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории климатических исследований¹⁾, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾.

Ирина Вадимовна Костюченко – аспирант кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – И. С. Данилович.

Authors:

Irina S. Danilovich, PhD (geography), docent; leading researcher at the laboratory of climate research^a and associate professor at the department of general geography of the general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b.
irina-danilovich@yandex.ru

Irina V. Kostyuchenko, postgraduate student at the department of the general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.
kostyuchenko_irina89@mail.ru

CHANGES IN WIND REGIME ACROSS THE TERRITORY OF BELARUS AND ITS POSSIBLE CAUSES

I. S. DANILOVICH^{a, b}, I. V. KOSTYUCHENKO^b

^a*Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Francyska Skaryny Street, Minsk 220114, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Corresponding author: I. V. Kostyuchenko (kostyuchenko_irina89@mail.ru)

Abstract. The article presents the results of a study of wind speed dynamics in the Atlantic-European sector and in more detail on the territory of Belarus. It is shown that the decrease in wind speed in the country since the 1970s, identified in the works of Belarusian researchers, was synchronised with the weakening of winds over most of the European continent. However, since 2010, there has been a tendency for wind speed to increase at most stations in the country. The work provides confirmation that the identified trend corresponds to the situation in most of Europe. In addition, wind speed trends correlate with the dominant phase of the North Atlantic Oscillation. Such changes in wind dynamics may be due to natural factors, such as changes in circulation conditions, as well as technical factors. Using five statistical tests (standard normal test for homogeneity, non-parametric Pettitt test, Buishand *Q*-test, Buishand range test and Buishand likelihood ratio test), the presence of disturbances in the series of average annual wind speed and interannual variability was determined individually for each meteorological station. Information from the history of meteorological stations on the transfer of meteorological sites, changes in horizon closure and replacement of wind measuring instruments is analysed. This made it possible to identify stations where a decrease or increase in wind speed could be associated with a technical impact on wind characteristics.

Keywords: wind speed; interannual variability; wind regime; uniformity of series; protection of the meteorological site; transfer of the meteorological site; wind measuring instrument.

Acknowledgements. The study was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. H23RNF-122).

Введение

Изменения климата в глобальном масштабе влекут за собой значительные преобразования метеорологических параметров, в том числе ветрового режима в различных регионах. Направление и величина происходящих изменений ветрового режима являются неоднородными во времени и пространстве и характеризуются значительной междекадной изменчивостью, обусловленной динамикой атмосферной циркуляции в макрорегионах.

На протяжении четырех-пяти последних десятилетий (с 1970-х гг.) скорость ветра снижалась в большинстве регионов Северного полушария, включая Северную Америку, Европу и Азию [1–3], хотя отдельные исследования указывают на изменение этой тенденции. В некоторых регионах Азии [4] снижение прекратилось после 2003 г. В Российской Арктике отмечается увеличение средней скорости ветра [5]. В бассейне Балтийского моря прогнозируется усиление скорости ветра на 5–10 % [6].

Изменение скоростного режима ветра на территории Беларуси синхронизировано с тенденциями, характерными для Европейского региона. С 1970-х гг. происходит постепенное снижение средней скорости ветра на всех метеорологических станциях и составляет 0,9–1,0 м/с. В период с 1948 по 1988 г. среднегодовая скорость ветра колебалась в пределах 3,3–3,6 м/с, а с 1989 г. она составляет от 2,5 до 2,8 м/с [7]. Но в 1990-х гг. на многих станциях снижение скорости ветра замедлилось, особенно такая тенденция характерна для южной части страны [8].

В период с 2010 по 2021 г. на некоторых станциях Беларуси произошел разворот трендов скорости ветра [9]. Положительные тренды наблюдаются в рядах среднегодовой скорости ветра с 2010 г. На метеостанции Могилёв величина линейного тренда за 12 лет составляет ~0,9 м/с, а на метеостанции Горки – 0,8 м/с. Максимальные порывы ветра в летние месяцы увеличиваются с 2000 г. В зимние месяцы на 20 станциях из 26 изучаемых также отмечены положительные тренды сезонной скорости ветра. Наибольшее положительное значение тренда было выявлено на метеостанции Гродно, оно составляет ~1,1 м/с за 12 лет [10]. Кроме того, согласно [9] ожидаются значимые изменения в ветровом режиме в количестве дней с сильным ветром.

Описанные тенденции скорости ветра на территории Беларуси зависят от динамики скоростного режима ветра в Атлантико-Европейском секторе. Это дает основание предполагать, что разворот

трендов на территории нашей страны, вероятнее всего, обусловлен изменениями в общей циркуляции атмосферы.

Однако, помимо природных факторов, например перемен в циркуляционных условиях, причиной изменения показателей ветрового режима могли стать и технические воздействия в процессе производства инструментальных измерений за характеристиками ветра. Причины нарушения однородности метеорологических рядов могут быть связаны с заменой приборной базы, переносом метеорологической площадки и, как следствие, изменением характеристик подстилающей поверхности, разгона ветрового потока, а также закрытости горизонта в окрестности станции.

В связи с неопределенностью в причинах изменения ветрового режима цель настоящей работы заключалась в установлении ведущего фактора нарушения однородности в рядах скорости ветра, среди которых изучался природный фактор – общая циркуляция атмосферы, а также техногенный фактор, включающий перенос метеорологической площадки, изменение характера окружающей местности (вырубка леса, застройка и снос строений) и изменение типов приборов, их установок или методики наблюдений.

Методика и исходные данные

Определение тенденций ветрового режима в Европейском регионе за период с 1951 по 2023 г. выполнено на основе данных реанализа ERA5 [11] о среднегодовой скорости ветра. Рассчитаны величины линейных трендов за три периода (1951–1970, 1971–2010 и 2011–2023 гг.). Выбранные периоды соответствуют преобладающим фазам Северо-Атлантического колебания, в которые существенно различаются распределение атмосферного давления в Атлантико-Европейском секторе и, соответственно, градиент, определяющий силу ветра.

Для оценки динамики ветрового режима на территории Беларуси использованы материалы Государственного климатического кадастра Республики Беларусь о наблюдениях за скоростью ветра на высоте 10 м по 39 метеорологическим станциям наблюдательной сети Белгидромета. Период обобщения охватывает временной интервал с 1950 по 2022 г. Данные наблюдений представлены средними годовыми значениями скорости ветра. Под средней скоростью понимается скорость, осредненная за 10-минутный интервал в срок наблюдений и обобщенная за сутки из 8 сроков наблюдений, далее за месяц и год¹.

Для выявления точки нарушения однородности и изменения ветрового режима вследствие технических воздействий определялись погодичные величины межгодовой разницы скорости ветра (параметр А) на каждой метеорологической станции.

В качестве дополнительной информации для выявления возможного влияния технических мероприятий использованы сведения из истории каждой метеорологической станции, представленные в [12; 13] данные по закрытости горизонта метеоплощадок по восьми румбам в соответствии с классификацией В. Ю. Милевского, а также данные о переоснащении станций приборами на протяжении периода функционирования исследуемых метеостанций.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой при проверке однородности метеорологических рядов используются статистические тесты, которые позволяют определить год нарушения однородности. В настоящем исследовании были применены следующие тесты.

1. *Стандартный нормальный тест для проверки однородности (standard normal homogeneity test, SNHT)*, основанный на методе испытания на соотношение.

Ряд метеорологической величины $Y_1, \dots, Y_n$ длиной n разбивается на две части, содержащие k и $n - k$ членов. При этом

$$T_k = k(\bar{z}_1)^2 + (n - k)\bar{z}_1^2,$$

$$\text{где } \bar{z}_1 = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})}{s} \text{ и } \bar{z}_2 = \frac{1}{n - k} \frac{\sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y})}{s}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad s^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2.$$

Если в момент K присутствует сдвиг, то функция $T(k)$ принимает максимальное значение вблизи $k = K$. Если $T_{\max}$ выше критического значения, определяемого по длине выборки, то ряд считается неоднородным.

¹Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила проведения проверки приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях. ТКП 17.10-18-2009 (02120). Введ. 01.01.2010. Минск : Минприроды, 2009. III, 80 с.

2. *Непараметрический тест Петтитта (Pettitt test)*, основанный на двухвыборочном тесте Манна – Уитни. Ряд метеорологической величины $Y_1, \dots, Y_n$ ранжируется, полученные ранги $r_1, \dots, r_n$ используются при расчете статистики

$$X_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1).$$

Если присутствует сдвиг, то статистика достигает максимального или минимального значения.

3. *Тест Буишанда (Buishand test)*, основанный на скорректированных частичных суммах:

$$S(k) = \sum_{i=1}^k \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma},$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}$.

При этом максимальное или минимальное значение $S(k)$ называется вероятной точкой изменения. Т. А. Буишанд предложил несколько способов проверки чувствительности этого теста на однородность:

- *Q-тест Буишанда (Buishand_Q)*. В этом тесте Q рассчитывается в соответствии с приведенным ниже уравнением:

$$Q = \frac{\max(S(k))}{\sqrt{n}}.$$

Критические значения статистики можно получить из таблицы Буишанда;

- *тест дальности Буишанда (Buishand_r)*. В этом методе диапазон R рассчитывается с использованием уравнения

$$R = \frac{\max(S(k)) - \min(S(k))}{\sqrt{n}}.$$

Критические значения тестовой статистики можно получить из таблицы Буишанда;

- *тест отношения правдоподобия Буишанда (Buishand_lhr)*. Статистика теста $V(k)$ рассчитывается по уравнению

$$V = \max \left(\frac{|S(k)|}{\sqrt{k(n-k)}} \right).$$

Критические значения данной тестовой статистики получаются на основе моделирования Монте-Карло.

В соответствии с [14] ряд наблюдений считается однородным, если не выполняется только один из тестов. В случае если два теста отрицают однородность, то ряд наблюдений является сомнительным. Если наличие неоднородности ряда наблюдений подтверждается большим количеством тестов, то данный ряд считается неоднородным.

Перечисленные статистические тесты применялись для рядов данных среднегодовой скорости ветра и для рядов межгодовой изменчивости средней скорости ветра (параметр А) по метеорологическим станциям Беларуси.

Результаты и их обсуждение

Результаты инструментальных наблюдений являются основой для достоверного анализа скорости ветра особенно над поверхностью морей и океанов [15]. Однако данные измерений часто зависят от местных условий, неоднородности подстилающей поверхности, увеличения шероховатости с течением времени из-за растительности и развития инфраструктуры, широкомасштабных изменений в землепользовании [16]. Многие исследователи отвергают использование инструментальных наблюдений за ветром, считая, что данные реанализов более точно отражают динамику скорости ветра.

Результаты, выполненные с применением данных реанализов метеорологических полей и касающиеся изменений или тенденций ветрового режима в Европейском регионе, сильно зависят от рассматриваемого периода и региона [17]. Изменения ветрового режима в Европе прослеживаются через связь с крупномасштабной изменчивостью атмосферы над Северной Атлантикой. Трансформацию общей циркуляции атмосферы можно проследить через динамику Северо-Атлантического колебания. С преобладающей фазой Северо-Атлантического колебания связаны положение струйных течений и траектории штормов, а также величина градиента давления в Северной Атлантике.

Многолетние тенденции Северо-Атлантического колебания в период с 1899 по 2018 г. являются непостоянными и характеризуются большой межгодовой и междекадной изменчивостью [18]. На рис. 1

представлены тенденции изменения (линейные тренды) скорости ветра в различные периоды. С середины 1960-х гг. наблюдается положительная тенденция к более зональной циркуляции, ослаблению градиента давления и, как следствие, ослаблению скорости ветра [19]. Однако после середины 1990-х гг. наметилась тенденция к отрицательным индексам Северо-Атлантического колебания [20], т. е. возрастанию разницы атмосферного давления между севером и югом и, как следствие, усилению скорости ветра. Это во многом объясняет десятилетние изменения скорости ветра на высоте 10 м в Европе с преобладанием слабых ветров зимой с 1980-х гг. и усилением скорости ветра в 1990-х гг. [21].

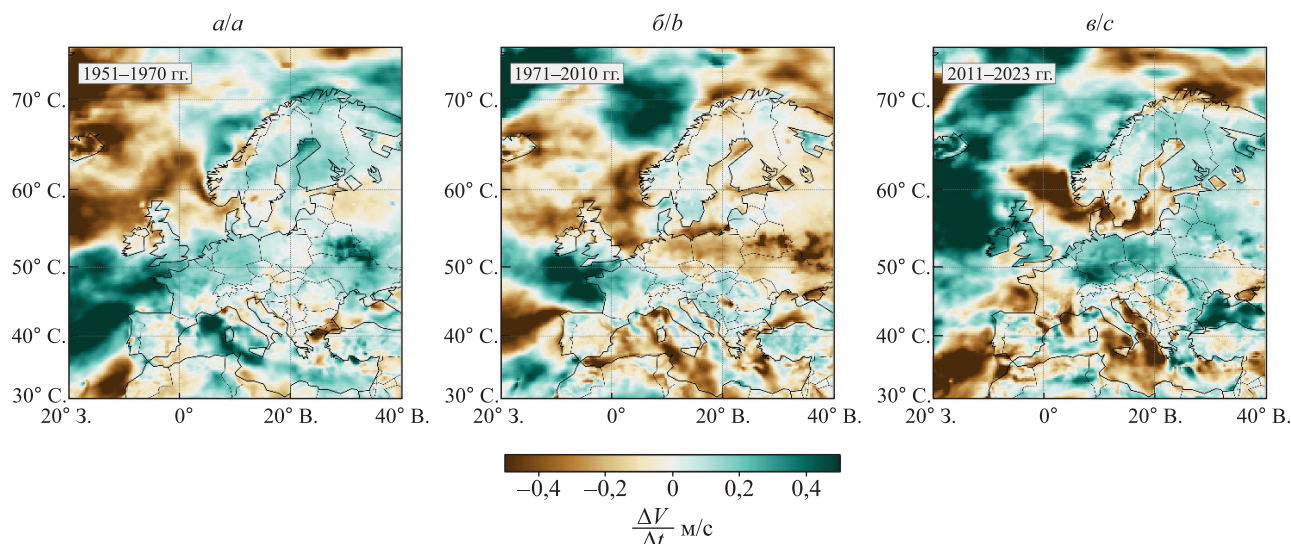


Рис. 1. Распределение линейных трендов среднегодовой скорости ветра в Атлантико-Европейском секторе, рассчитанной по данным реанализа ERA5, в периоды с 1951 по 1970 г. (а), с 1971 по 2010 г. (б), с 2011 по 2023 г. (в)

Fig. 1. Distribution of linear trends of average annual wind speed in the Atlantic-European sector calculated according to ERA5 reanalysis data in the period from 1951 to 1970 (a), from 1971 to 2010 (b), from 2011 to 2023 (c)

Ряд исследований показывают снижение скорости ветра на территории Беларуси с 1970-х гг. На рис. 2 представлена динамика среднегодовой скорости ветра по 39 метеорологическим станциям в период с 1950 по 2022 г. Тренды скорости ветра на территории Беларуси были проанализированы авторами ранее и описаны в [22], поэтому в настоящей работе мы не будем на этом останавливаться.

Проведенные тесты на однородность рядов наблюдений показали нарушение осредненной скорости ветра по всем станциям с 1981 г. Разница между двумя периодами составляет 0,9 м/с.

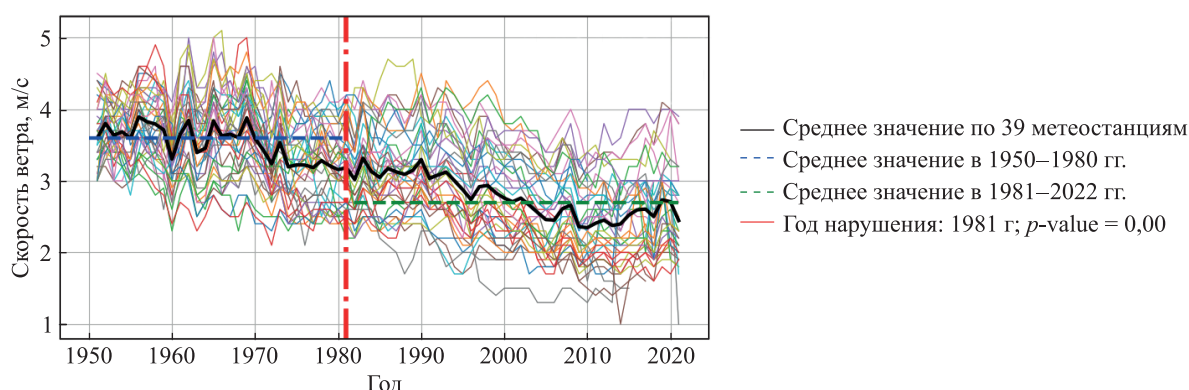


Рис. 2. Динамика среднегодовой скорости ветра по 39 метеорологическим станциям в период с 1950 по 2022 г.

Fig. 2. Dynamics of average annual wind speed at 39 meteorological stations in the period from 1950 to 2022

При анализе результатов наблюдений индивидуально по каждой станции статистические тесты показали наличие нарушений в рядах средней годовой скорости ветра в различные годы (см. таблицу).

Результаты статистических тестов на однородность рядов среднегодовой скорости ветра и межгодовой изменчивости скорости ветра по метеорологическим станциям за период с 1950 по 2022 г. и сведения о возможных причинах нарушения однородности

Results of statistical tests for the homogeneity of series of average annual wind speed and interannual variability of wind speed at meteorological stations for the period from 1950 to 2022 and information about possible reasons for violation of homogeneity

Станция	Среднегодовая скорость ветра			Межгодовая изменчивость среднегодовой скорости ветра		
	Год	$P_{\text{случ}}$	Пояснение	Год	$P_{\text{случ}}$	Пояснение
Барановичи	1986	0,00		1974	0,98	
Березино	1974	0,00		1657	0,93	
Бобруйск	2001	0,00		1970	0,91	
Борисов	1997	0,00		1961	0,79	В 1961 г. площадка перенесена на 8 км к северу
Брест	1976	0,00		1949	0,18	
Василевичи	1985	0,00		1948, 1959	0,01	В 1958–1962 гг. развернулось строительство трехэтажного здания школы в 100 м к юго-востоку от метеоплощадки. Мастерские школы закрывают всю южную часть горизонта
Верхнедвинск	1995	0,00		1961	0,38	
Вилейка	1991	0,00		1961	0,40	
Витебск	1984	0,00		1967	0,94	
Волковыск	1972	0,00	В ноябре 1972 г. в радиусе 100–150 м от метеоплощадки в западном, северо-западном и северном направлениях развернулось интенсивное строительство пятиэтажных зданий и закончилось в 1976 г.	1963	0,98	В сентябре 1962 г. площадка перенесена на 200 м к востоко-юго-востоку на открытое место
Воложин	1985	0,00		2007	0,22	
Высокое	1982	0,00		1953, 1957	0,00	В 1957 г. установлен флюгер с тяжелой доской
Ганцевичи	1968	0,00		1947	0,00	
Гомель	1981	0,00	В 1981 г. в 100 м к западу от метеоплощадки построена котельная, а в 200–300 м к северу возведены производственные корпуса молокозавода высотой до 15 м	1970	0,66	1 января 1970 г. метеонаблюдения перенесены на 12 км к юго-западу от аэропорта, на территорию зонной обсерватории
Горки	1992	0,00		1963	0,92	
Гродно	1999	0,01		1974	1,00	
Докшицы	1977	0,00	В 1976 г. произошла смена ветроизмерительного прибора, в 1977 г. в 80–90 м к востоко-юго-востоку от метеоплощадки закончено строительство двух одноэтажных домов высотой до 6 м	1966	1,00	
Езерище	2006	0,00		1970	0,36	В 1970 г. в 130 м к юго-западу от метеоплощадки построен одноэтажный деревянный дом

Житковичи	1977	0,00	В 1976 г. произошла смена ветроизмерительного прибора	1975	0,91	В 1976 г. произошла смена ветроизмерительного прибора
Жлобин	1978	0,00	В 1977 г. произошла смена ветроизмерительного прибора, в 1978–1979 гг. в 400–500 м к северо-западу от метеоплощадки построены два дома школы механизации в три и пять этажей	1959, 2021	0,01; 0,01	В 2021 г. произошла смена основного ветроизмерительного прибора
Ивацевичи	1970	0,00		1964	0,48	
Костюковичи	2003	0,00		1999	0,76	
Лида	1979	0,00	В 1978 г. в 80 м к юго-востоку от метеоплощадки построен пятиэтажный дом, а в 60 м к юго-юго-западу возведены три пятиэтажных дома. В 1981 г. осуществлен перенос площадки	1970	0,69	В 1969–1970 гг. в 200 м к западу, юго-западу от метеоплощадки возведены двухэтажные жилые дома
Лынтупы	1995	0,00		1964	0,85	
Марына Горка	1979	0,00	5 сентября 1978 г. произошла смена ветроизмерительного прибора	1947, 1948	0,00; 0,00	
Минск	1974	0,00	В 1973 г. в 130–150 м от метеоплощадки построено девятиэтажное кирпичное здание	2012	0,84	
Могилёв	1956	0,00		1974	0,99	
Мозырь	1983	0,00		1971	0,24	
Новогрудок	1992	0,00	к	1989	0,86	
Орша	1984	0,00		1967	0,86	
Ошмяны	2003	0,00		1991	0,88	
Пинск	1985	0,00	В 1984 г. метеоплощадка перенесена на 6,5 км к юго-западу	1970	0,78	
Полесская	1984	0,00		1983	0,87	
Полоцк	1974	0,00		1949	0,92	
Пружаны	1971	0,00	В 1966–1976 гг. в 120 м к востоку от метеоплощадки закончено строительство первой очереди завода	1983	0,86	В 1981–1985 гг. в 250–300 м к юго-востоку от метеоплощадки построены одно- и трехэтажные административные строения
Сенно	1988	0,00		1963	0,99	В 1963 г. перенесена метеоплощадка на расстояние 100 м на восток
Славгород	1982	0,00		1973	0,87	
Слуцк	1995	0,00		1974	0,95	
Шарковщина	1979	0,00	В 1978 г. закончено строительство двухэтажных общежитий	1963	0,08	

Нарушение в рядах данных выявлено на метеостанциях Могилёв и Ганцевичи в период с 1950 по 1969 г. В период значительного ослабления средней скорости ветра (с 1970 по 1989 г.) тесты показывают нарушения в рядах данных на 25 метеорологических станциях: в период с 1970 по 1979 г. нарушения в рядах данных выявлены на метеостанциях Ивацевичи, Пружаны, Волковыск, Березино, Минск, Полоцк, Брест, Докшицы, Житковичи, Жлобин, Лида, Марьина Горка и Шарковщина; в период с 1980 по 1989 г. – на метеостанциях Гомель, Высокое, Славгород, Мозырь, Витебск, Орша, Полесская, Василевичи, Воложин, Пинск, Барановичи, Сенно.

В период стабилизации средней скорости ветра в 1990–2009 гг. нарушения в рядах данных присутствуют на 12 метеостанциях: в период с 1990 по 1999 г. нарушения в рядах данных выявлены на метеостанциях Вилейка, Горки, Новогрудок, Верхнедвинск, Лынтупы, Слуцк, Борисов, Гродно; в период с 2000 по 2009 г. – на метеостанциях Бобруйск, Костюковичи, Ошмяны, Езерище.

При анализе межгодовой изменчивости (параметр А) статистические тесты в большинстве случаев показывают отсутствие статистически значимых нарушений. Исключение составляют метеостанции Ганцевичи, Марьина Горка, Василевичи, Высокое и Жлобин. Два теста из пяти проведенных подтверждают нарушение в рядах среднегодовой скорости ветра, что позволяет считать их сомнительными. С помощью тестов SNHT и отношения правдоподобия Буишанда точкой предполагаемого нарушения для метеостанции Ганцевичи определен 1947 г., для метеостанции Марьина Горка определены 1947 и 1948 гг., для метеостанции Василевичи – 1948 и 1959 гг., для метеостанции Высокое – 1953 и 1957 гг., а для метеостанции Жлобин – 1959 и 2021 гг.

Некоторые авторы отмечают, что в случае быстрых климатических изменений статистические тесты могут показать нарушение однородности, даже если его на самом деле не было [23]. По этой причине утверждение о нарушении однородности принималось только с учетом истории метеостанции. Если итоговая точка изменения не подтверждалась историческими сведениями по техническим причинам, то выявленная неоднородность принималась за естественное изменение под влиянием общей циркуляции атмосферы.

Возможные технические причины нарушения однородности рядов. Одной из возможных причин трансформации ветрового режима может служить перенос метеорологической площадки. За период своего функционирования только на 14 станций из 39 не осуществлялся перенос метеорологических площадок. На остальных станциях площадки переносились на расстояние от 20 м до 20 км.

На шести станциях перенос осуществлялся неоднократно. Дважды переносились площадки метеостанций Витебск, Минск и Могилёв, трижды – площадки метеостанций Гомель, Гродно, Полоцк. Всего в ходе анализа были выявлены 7 станций, на данные которых мог оказать влияние перенос площадки. Однако статистическое подтверждение о нарушении получено только для ряда данных метеорологической станции Пинск. Четыре теста из пяти указывают в качестве предполагаемой точки изменения 1985 г., а непараметрический тест Петтитта – 1984 г.

На рис. 3 в качестве примера представлена динамика средней годовой скорости ветра на метеостанциях Барановичи и Пинск за период с 1950 по 2022 г. Площадка метеостанции Пинск была перенесена в 1984 г. на 6,5 км к юго-западу. Площадка метеостанции Барановичи не переносилась, она приведена для сравнения. Хорошо видно, что график средней скорости ветра метеостанции Пинск четко разделен на две части, отличающиеся своим характером изменения. Средняя скорость ветра до 1985 г. составляет 3,89 м/с, а после 1985 г. – 2,4 м/с. При этом общая тенденция к снижению средней скорости ветра в 1970-х гг. и последующая стабилизация процесса в начале 2000-х гг. прослеживаются для обеих станций.

Кроме переноса, на скоростной режим влияет изменение защищенности метеорологических площадок. В настоящее время участок местности считается открытым, если расстояние между ветроизмерительным прибором и препятствием десятикратно превышает высоту препятствия. Такое требование об удалении является минимальным, поскольку волновые возмущения воздушного потока способны распространяться на расстояние, превышающее высоту препятствия в 12–15 раз.

Достоверность измеренных характеристик ветра очень сильно зависит от защищенности метеорологических площадок. Препятствия могут существенно исказить как направление ветра, так и скорость. Оценка защищенности метеорологических площадок проводится при осмотре окружения площадки с выявлением элементов защищенности, таких как деревья, здания, холмы, их высоты, а также расстояния между метеорологической площадкой и элементом. Закрытость горизонта определяется из центра метеоплощадки по восьми румбам в соответствии с классификацией В. Ю. Милевского [24].

Площадки практически всех исследуемых метеорологических станций в течение периода работы испытывали изменения в закрытости горизонта в той или иной степени. В большинстве случаев закрытость румбов увеличивалась за счет постройки новых зданий. Строились как отдельные одноэтажные дома или хозяйственные постройки на расстояниях от 50 м и более, так и целые массивы домов высотой в 5–9 этажей. Уменьшение закрытости на станциях часто происходило в связи с вырубкой высоких деревьев в непосредственной близости от площадок или частичной вырубкой леса на некотором расстоянии от площадки. В качестве подобного примера можно привести вырубку массива леса в 200–300 м от метеостанции Пружаны в период с 1986 по 1990 г.

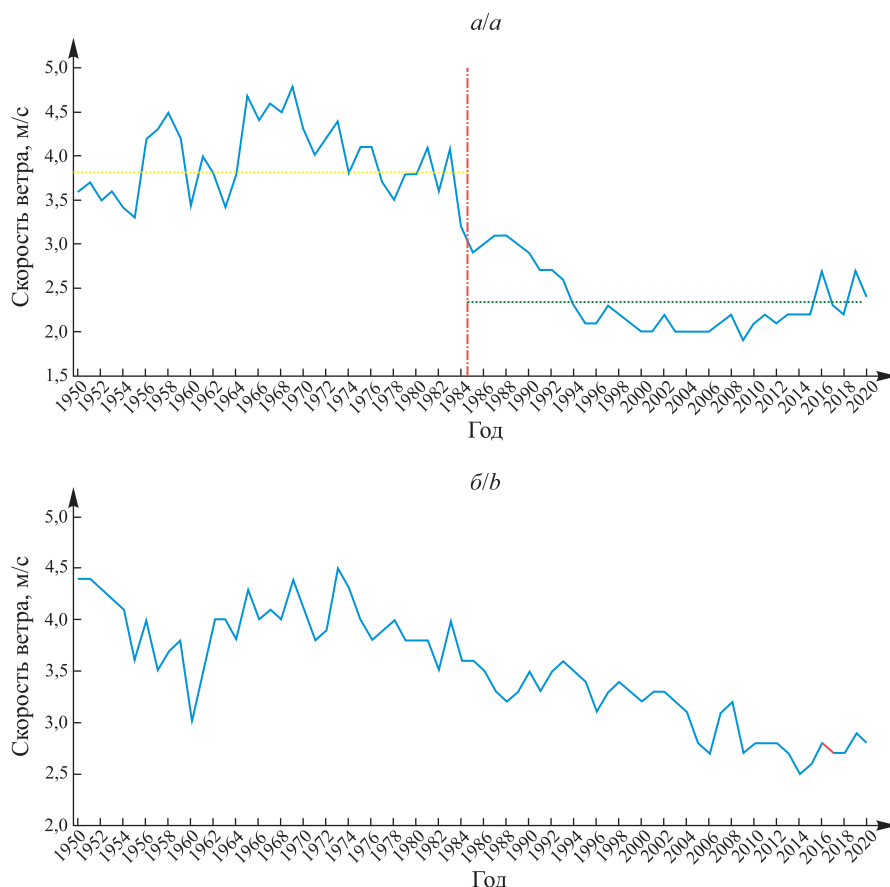


Рис. 3. Среднегодовая скорость ветра за период с 1950 по 2022 г.
на метеостанциях Пинск (а) и Барановичи (б). Линией красного цвета указана точка изменения;
желтая и зеленая линии показывают средние значения скорости ветра до и после изменения соответственно

Fig. 3. Average annual wind speed for period from 1950 to 2022
at weather stations Pinsk (a) and Baranavichy (b). The red line indicates the point of change;
yellow and green lines indicate the average wind speeds before and after the change, respectively

Посредством статистических тестов подтверждено, что изменение защищенности могло повлиять на однородность данных среднегодовой скорости ветра на метеостанциях Волковыск, Гомель, Лида, Минск, Пружаны и Шарковщина (см. таблицу).

Замена ветроизмерительных приборов является еще одной причиной изменения характеристик скорости ветра. В ходе анализа типов приборов, используемых на метеостанциях Беларуси, а также времени их установки выявлены два периода, в которые происходило переоснащение станций. На период с 1965 по 1978 г. приходится первая волна замены приборов во всей гидрометеорологической сети Беларуси. Флюгеры с тяжелой и легкой доской были заменены на анеморумбометры М63, М63М или М63М-1 (Россия).

Вторая волна замены ветроизмерительных приборов приходится на современный период (с 2005 по 2022 г.). Метеостанции переоснащаются датчиками скорости ветра WAA151 и датчиками направления ветра WAV151, которые входят в состав АМИИС (Vaisala, Финляндия), а также анеморумбометрами «Пеленг СФ-03» (Беларусь).

При рассмотрении графиков средней годовой скорости ветра по станциям можно обнаружить некоторые отличия в показателях скорости ветра, измеренных по разным приборам. Эти отличия объясняются тем, что период осреднения у флюгера и анемометра неодинаков: у флюгера период осреднения составляет 2 мин, у анемометра – 10 мин. Кроме того, как показано в [25], при больших скоростях ветра показания, измеренные флюгером, систематически завышаются из-за нелинейности его шкалы. По этой причине для расчета максимальных скоростей ветра в данные о скорости ветра, измеренные флюгером, начиная с 10 м/с, вводится поправочный коэффициент. Но средняя скорость ветра может быть рассчитана без введения поправок, если она составляет менее 7 м/с.

Анализ влияния замены приборов на показатели скорости осложнялся тем, что оба периода замены датчиков приходится на период преобразования ветровых характеристик: в 1970-х гг. начинается период уменьшения среднегодовой скорости ветра, а после 2010 г. – период увеличения данной характеристики. Однако было замечено, что в 1970-х гг. ветровые характеристики изменили свою тенденцию раньше,

чем произошла смена прибора наблюдения за ветром. Аналогичная ситуация наблюдается и в последнее десятилетие: рост характеристик чаще всего начинается раньше, чем происходит переоснащение станций. Кроме того, установленные различия лучше прослеживаются в первый период замены приборов. Всего были выявлены 4 метеорологические станции из 39 проанализированных, на показатели ветрового режима которых могла повлиять замена приборов в 1970-х гг.: Докшицы, Житковичи, Жлобин и Марьина Горка.

Для второго этапа замены приборов подтверждения о нарушении в рядах наблюдений не выявлено. В качестве примера на рис. 4 приведены графики среднегодовой скорости ветра на метеостанциях Житковичи и Жлобин. Средняя скорость ветра до точки изменения на метеостанции Житковичи (1977) составляет 3,44 м/с, после – 2,31 м/с. Средняя скорость ветра до точки изменения на метеостанции Жлобин (1978) составляет 3,16 м/с, а после – 2,25 м/с.

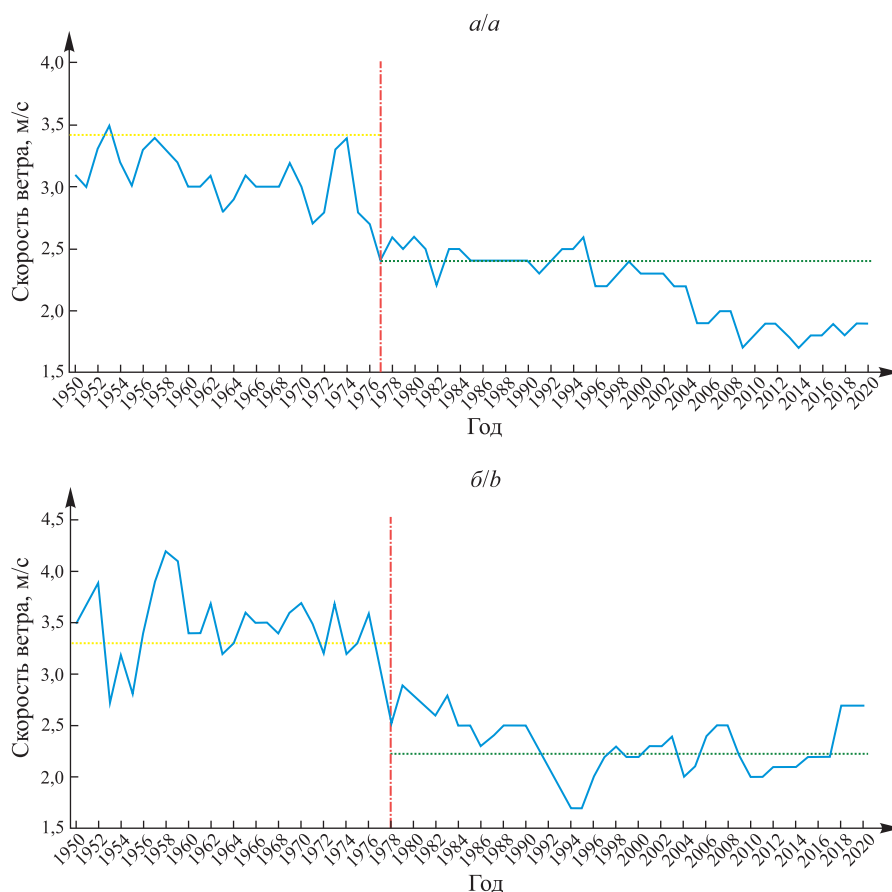


Рис. 4. Среднегодовая скорость ветра за период с 1950 по 2020 г. на метеостанциях Житковичи (а) и Жлобин (б). Линией красного цвета указана точка изменения; желтая и зеленая линии показывают средние значения скорости ветра до и после изменения соответственно

Fig. 4. Average annual wind speed for the period from 1950 to 2020 at the Zhytkavichy (a) and Zhlobin (b) weather stations. The red line indicates the point of change; yellow and green lines indicate average wind speed values before and after the change, respectively

Заключение

Проведенный анализ тенденций изменения скорости ветра в Атлантико-Европейском секторе и более детально для территории Беларуси подтверждает гипотезу о том, что современные изменения скоростного режима ветра, наиболее вероятно, связаны с общей циркуляцией атмосферы, при этом сложное сочетание природного и техногенного факторов в изменении скорости ветра не исключается.

Снижение скорости ветра на территории Беларуси с 1970-х гг. коррелирует с отрицательными трендами скорости ветра на территории Европы. Это связано с преобладающей положительной фазой Северо-Атлантического колебания и, как следствие, ослаблением градиента атмосферного давления, определяющего силу ветра. Стабилизация с 1990-х гг. и наметившиеся тенденции увеличения скорости ветра с 2010 г. на большей половине станций Беларуси особенно в летний период синхронизированы с положительными трендами скорости ветра на большей части Европейского континента. Выделенные периоды подтверждаются применением статистических методов, указывающих на нарушение однородности в рядах скорости ветра на территории Беларуси.

Проведенное исследование на наличие технических воздействий в эти периоды позволило исключить из анализа станции, на которых снижение или увеличение скорости ветра может быть связано с заменой приборов, строительством в окрестностях станции и переносом площадки.

Таким образом, изменение скоростного режима на территории Беларуси связано с комплексным влиянием природных и техногенных факторов, в первую очередь с общей циркуляцией атмосферы, и техническими мероприятиями на некоторых станциях. Но установленные тренды снижения и последующего роста скорости ветра синхронизированы с макрорегиональными тенденциями в Европе, где ведущая роль принадлежит динамике атмосферной циркуляции.

Библиографические ссылки

1. Tian Q, Huang G, Hu K, Niyogi D. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016. *Energy*. 2019;167:1224–1235. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.027.
2. The BACC II Author Team. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. Cham: Springer; 2015. XXXVIII, 501 p. (Bolle H-J, Menenti M, Ichtiague Rasool S, editors. Regional climate studies). DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1.
3. Ministry of Environment of the Republic of Latvia. *Fourth national communication of the Republic of Latvia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Riga: Ministry of the Environment of the Republic of Latvia; 2006. 160 p.
4. Kim J, Paik K. Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: a focus on South Korea. *Climate Dynamics*. 2015;45(5–6):1699–1712. DOI: 10.1007/s00382-015-2546-9.
5. Platonov V, Kozlov F, Boiko A. Extreme wind speed long-term trends evaluation in the Russian Arctic based on the COSMO-CLM 36-years hindcast. *Environmental Sciences Proceedings*. 2023;27(1):6. DOI: 10.3390/ecas2023-15126.
6. Nikulin G, Kjellström E, Hansson U, Strandberg G, Ullerstig A. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2011;63(1):41–55. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x.
7. Камлюк ГГ. Оценка ветроэнергетических ресурсов Республики Беларусь в условиях изменения климата. В: Пирожник ИИ, Антипова ЕА, Власов БП, Витченко АН, Клебанович НВ, Смоляков ГС и др., редакторы. *Географические науки в обеспечении стратегии устойчивого развития в условиях глобализации (к 100-летию со дня рождения профессора Н. Т. Романовского)*. Материалы Международной научно-практической конференции; 25–28 октября 2012 г.; Минск, Беларусь. Минск: Издательский центр БГУ; 2012. с. 280–282.
8. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. 2-е издание. Минск: Энциклопедикс; 2020. 263 с.
9. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1–2:35–48.
10. Данилович ИС, Костюченко ИВ. Трансформация ветрового режима на территории Беларуси в условиях изменяющегося климата. *География*. 2023;2:8–16.
11. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146(730):1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
12. Гольдберг МА, редактор. *История и физико-географическое описание гидрометеорологических станций Беларуси*. Минск: Белгидромет; 2003. 76 с.
13. Кобышева НВ, Стадник ВВ, Ключева МВ, Пигольщина ГБ, Акентьева ЕМ, Галюк ЛП и др. *Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами*. Кобышева НВ, редактор. Санкт-Петербург: [б. и.]; 2008. 336 с.
14. Woodruff SD, Worley SJ, Lubker SJ, Ji Z, Freeman JE, Berry DI, et al. ICOADS release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *International Journal of Climatology*. 2011;31(7):951–967. DOI: 10.1002/joc.2103.
15. Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut J-N, Ciais P. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geoscience*. 2010;3(11):756–761. DOI: 10.1038/ngeo979.
16. Feser F, Krueger O, Woth K, van Garderen L. North Atlantic winter storm activity in modern reanalyses and pressure-based observations. *Journal of Climatology*. 2021;34(7):2411–2428. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0529.1.
17. Rutgersson A, Kjellström E, Naapala J, Stendel M, Danilovich I, Drews M, et al. Natural hazards and extreme events in the Baltic Sea region. *Earth System Dynamics*. 2022;13(1):251–301. DOI: 10.5194/esd-13-251-2022.
18. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(6):1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
19. Sousa PM, Trigo RM, Barriopedro D, Soares PMM, Ramos AM, Liberato MLR. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamics*. 2017;48(3–4):1141–1160. DOI: 10.1007/s00382-016-3132-5.
20. Laurila TK, Sinclair VA, Gregow H. Climatology, variability, and trends in near-surface wind speeds over the North Atlantic and Europe during 1979–2018 based on ERA5. *International Journal of Climatology*. 2021;41(4):2253–2278. DOI: 10.1002/joc.6957.
21. Костюченко ИВ, Данилович ИС. Оценка трендов скорости ветра на территории Беларуси на современном этапе. В: Лопух ПС, Гледко ЮА, Логинова ЕВ, редакторы. *Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры общего землеведения и гидрометеорологии Белорусского государственного университета; 11–13 октября 2023 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2023. с. 494–498.
22. Демин ВИ, Иванов БВ. Проверка климатической однородности рядов температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген). В: Войтеховский ЮЛ, редактор. *Математические исследования в естественных науках. Труды XVI Всероссийской научной школы; 22 октября 2019 г.; Апатиты, Россия*. Апатиты: [б. и.]; 2019. с. 134–150.
23. Милевский ВЮ. Методика исследования скоростных роз и скоростных роз-диаграмм ветра. *Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова*. 1960;113:57–70.
24. Млявая ГВ. *Пространственно-временная характеристика ветрового режима на территории Республики Молдова* [диссертация]. Кишинев: [б. и.]; 2016. 143 с.

Получена 20.05.2024 / исправлена 05.09.2024 / принята 18.09.2024.
Received 20.05.2024 / revised 05.09.2024 / accepted 18.09.2024.