

## КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек<sup>1</sup>, А. В. Гречаник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь;

<sup>2</sup>Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние форм атмосферной циркуляции по Вангенгейму – Гирсу на ветровой режим территории Беларуси. Построены картосхемы среднегодовых скоростей ветра для циркуляционных эпох. Для меридиональной циркуляционной эпохи наиболее характерными являются среднегодовые скорости ветра от 3,81 до 4,20 м/с, при восточной форме циркуляции – от 3,01 до 3,60, при западной форме – от 2,41 до 3,20 м/с. Поля среднегодовых скоростей ветра при восточной и западной формах атмосферной циркуляции схожи. Анализ статистической значимости различий среднегодовых скоростей ветра между циркуляционными эпохами показал значимые различия между всеми сравниваемыми периодами.

В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра по восьми румбам между Е + С и Е циркуляционными эпохами максимальные различия (70,59 %) характерны для южного направления ветра, доля которого при восточной циркуляционной эпохе значительно увеличивается. Между Е + С и W циркуляционными эпохами различия в повторяемости направлений ветра выражены более ярко: максимальные различия характерны для юго-восточного (76,47 %) и южного (82,35 %) направлений. Различия между изменчивостью направлений ветра Е и W циркуляционных эпох выражены слабее.

**Ключевые слова:** циркуляция атмосферы Вангенгейма – Гирса; скорость и направление ветра; изменение ветрового режима.

**Для цитирования.** Волчек А. А., Гречаник А. В. Колебания атмосферной циркуляции и изменение ветрового режима на территории Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 27–37.

## VARIABILITY OF ATMOSPHERIC CIRCULATION AND CHANGES IN THE WIND REGIME OF THE TERRITORY OF BELARUS

А. А. Volchek<sup>1</sup>, А. В. Hrachanik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Belarus;

<sup>2</sup>Brest State A. S. Pushkin University, Brest, Belarus

**Abstract.** The paper considers the influence of atmospheric circulation forms according to Wangenheim – Girs on the wind regime of the territory of Belarus. Maps of average annual wind speeds for circulation epochs are constructed. For the meridional circulation epoch, the most typical are average annual wind speeds from 3.81 to 4.20 m/s, with the eastern circulation form – from 3.01 to 3.60, with the western form – from 2.41 to 3.20 m/s. The fields of average annual wind speeds for the eastern and western forms of atmospheric circulation are similar. The analysis of the statistical significance of the differences in average annual wind speeds between circulation epochs showed significant differences between all circulation epochs.

As a result of the analysis of the sample average repeatability of wind directions for eight rhumbas between the Е + С and Е circulation epochs, the maximum differences (70.59 %) are characteristic of the southern wind direction, the share of which significantly increases during the eastern circulation epoch. Between the Е + С and W epochs, the differences in the repeatability of wind directions are expressed more clearly: the maximum differences are characteristic of the southeastern (76.47 %) and southern (82.35 %) directions. The differences between the variability of wind directions between the Е and W circulation epochs are expressed less clearly.

**Keywords:** Belarus; Wangenheim – Girs atmospheric circulation; wind speed and direction; wind regime changes.

**For citation.** Volchek A. A., Hrachanik A. V. Variability of atmospheric circulation and changes in the wind regime of the territory of Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 27–37.

**Введение.** В настоящее время одной из актуальных проблем климатологии является оценка наблюдаемых изменений климата, определяемых в первую очередь ростом среднегодовой температурой воздуха. Исследованием изменения приземной температуры воздуха как индикатора изменения климата занимались многие исследователи [1–3]. Кроме приземной температуры воздуха, важным фактором изменения климата является режим атмосферной циркуляции, который влияет на другие метеорологические характеристики (скорость и направление ветра, температуру, влажность и др.) [4, 5].

Атмосферная циркуляция определяет межширотный обмен теплыми и холодными воздушными массами и влагой. Особый интерес представляет исследование взаимосвязи изменчивости форм циркуляции и ветрового режима. Для территории Беларуси данная проблема исследована недостаточно полно, и для получения объективной картины такой взаимосвязи необходимо проведение дополнительных исследований.

Объектом исследования является территория Беларуси, предметом исследования – изменчивость ветрового режима.

Цель работы – исследовать временную изменчивость характеристик поля ветра в связи с изменением циркуляции атмосферы в 1949–2020 гг. и дать оценку их взаимосвязи.

**Материалы и методы исследования.** Информационную базу для проведения исследования составили данные многолетних инструментальных наблюдений за скоростью и направлением ветра на 17 метеорологических станциях, опубликованные в Государственном климатическом кадастре Департамента по гидрометеорологии Республиканского центра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, за период 1949–2020 гг.

Классификация форм циркуляции атмосферы Вангенгейма – Гирса для приатлантической части Арктики основана на понятии элементарного синоптического процесса (ЭСП), введенного Г. Я. Вангенгеймом. ЭСП – промежуток времени, в течение которого остаются постоянными распределение давления и направление основных теплых и холодных воздушных течений [6, 7]. В данной классификации выделено 26 типов ЭСП, обобщенных в 3 типа циркуляции (группы макропроцессов): западную (W), восточную (E), меридиональную (C). Выделенные формы учитывают характер длинных термобарических волн в толще тропосфера через траектории барических образований и направление барических и термобарических градиентов. Каждой форме атмосферной циркуляции соответствует собственные преобладающие траектории перемещения циклонов, изменяющиеся от холодного к теплому сезону [8].

Основным фактором, формирующим ветровой режим на территории Беларуси, является общая циркуляция атмосферы над континентом Евразия и над Атлантикой. Последняя определяется наличием стационарных барических центров: Исландского минимума, Азорского максимума и сезонного зимнего Сибирского максимума. Вся территория Беларуси на протяжении всего года расположена севернее полосы высокого атмосферного давления – оси Войкова. Зимой к северу от этой оси в большинстве случаев дуют юго-западные и западные ветры, а летом – северо-западные и западные. Преобладающие в течение года потоки воздуха западных направлений приносят на территорию Беларуси господствующий в течение всех сезонов атлантический воздух умеренных широт, проникновение которого связано с циклонической деятельностью на полярном или арктическом фронте. При прочих направлениях ветров в соответствии с сезонами года расширяется область распространения континентальных умеренных, арктических или тропических воздушных масс, которые в формировании климата Беларуси играют меньшую роль. Изменение ветрового режима влечет за собой значительные климатические изменения.

В качестве характеристик атмосферной циркуляции нами были использованы формы атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма – Гирса.

Для исследования особенностей изменения ветрового режима Беларуси основной интерес представляют формы циркуляции в атлантико-евразийском секторе. В работах [9, 10] выделены следующие эпохи атмосферной циркуляции: 1949–1964 гг. (E + C), 1965–1988 гг. (E), 1989–2011 гг. (W), 2011–2020 гг. (E).

Типизация атмосферных процессов Вангенгейма – Гирса учитывает характер длинных термобарических волн, наблюдавшихся в тропосфере и нижней части стратосферы и связанных с ними особенностей распределения метеорологических полей. При процессах W формы в тропосфере наблюдаются быстро смещающиеся с запада на восток волны небольшой амплитуды. Для таких процессов характерен как зональный перенос воздуха, так и перенос с некоторым возмущением зонального потока. Таким образом, при W циркуляции формируются зонально расположенные области положительных и отрицательных аномалий метеорологических элементов. В холодное время года при W циркуляции перемещения циклонов осуществляются в зоне между центрами областей низкого давления и отрицательными аномалиями давления. В теплое время года в западных частях барических гребней происходит смещение циклонов на север и северо-восток, в восточных частях гребней – на восток и юго-восток, и расположены зонально [8].

Е и С формы циркуляции характеризуют развитие двух типов меридиональных движений в атмосфере. При формировании указанных форм циркуляции в толще тропосферы им соответствуют стационарные волны с большой амплитудой. Устойчивое положение высотных гребней и ложбин обуславливает длительное сохранение знака адвекции, характера дивергенции и конвергенции и вертикальных движений воздуха в районе. Это приводит к формированию под восточными частями высотных гребней меридионального расположенных областей положительных аномалий давления, а под западными частями высотных гребней – отрицательных аномалий давления воздуха. При Е циркуляции хорошо развита меридиональность, которая прослеживается в расположении траекторий циклонов. Смещение циклонов в западных частях высотных гребней происходит на северо-восток, а в восточных частях гребней – на юго-восток. Циклоны огибают высотный гребень над Британскими островами, смещаются на северо-восток, достигают Гренландского и Баренцева морей. При С циркуляции траектории перемещения циклонов проходят от восточного побережья Северной Америки, огибая Гренландию, до Баренцева и Гренландского морей, с последующим вторжением на территорию Европы и европейской части России [8, 11].

Особый интерес представляют исследования различий скорости и направления ветра в разные циркуляционные эпохи. На протяжении периода исследования доминирующей формой циркуляции была Е (суммарно 34 года). При анализе временных рядов для оценки различий в статистических параметрах мы использовали *t*-критерий Стьюдента и *F*-критерий Фишера:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \hat{\sigma}_x^2 + n_y \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (1)$$

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2)$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – выборочные средние;  $\hat{\sigma}_x^2$ ,  $\hat{\sigma}_y^2$  – выборочные дисперсии;  $n_x$ ,  $n_y$  – объемы выборок.

Полученное значение *t*-критерия Стьюдента и *F*-критерия Фишера сравнивали с их критическими значением при заданном уровне значимости  $\alpha = 5\%$ . Если  $t > t_\alpha$ , принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних, а при  $F > F_\alpha$  – гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов [12].

**Результаты и их обсуждение.** В результате анализа выборочных средних среднегодовых скоростей ветра между всеми циркуляционными эпохами выявлены статистически значимые различия. Так между Е + С и Е эпохами статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены в 70,59 % случаев, между Е + С и W – в 88,24, а между Е и W эпохами – в 76,47 % случаев (табл. 1). Из всех исследуемых метеорологических станций только на станции Могилёв не выделено статистически значимых различий. На станциях Гродно и Верхнедвинск выделены различия только между одной парой циркуляционных эпох, а на станциях Брагин, Новогрудок, Марьина Горка и Полоцк – между двумя парами эпох. На 10 из 17 метеорологических станций статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены для всех циркуляционных эпох.

**Таблица 1. Эмпирические значения *t*-критериев Стьюдента и *F*-критериев Фишера для среднегодовых скоростей ветра**

**Table 1. Empirical values of Student's *t*-tests and Fisher's *F*-tests for average annual wind speeds**

Метеостанция	Средняя скорость	Форма циркуляции		
		E + C / E	E + C / W	E / W
Барановичи	E + C = 3,86 E = 3,57 W = 3,23	<i>t</i> = 2,22 <i>F</i> = 2,61	<i>t</i> = 5,60 <i>F</i> = 2,17	<i>t</i> = 2,74 <i>F</i> = 5,66
Брест	E + C = 3,38 E = 2,73 W = 2,55	<i>t</i> = 9,73 <i>F</i> = 3,34	<i>t</i> = 11,54 <i>F</i> = 2,68	<i>t</i> = 2,25 <i>F</i> = 1,25
Пинск	E + C = 3,75 E = 3,44 W = 2,26	<i>t</i> = 1,89 <i>F</i> = 5,35	<i>t</i> = 12,74 <i>F</i> = 1,46	<i>t</i> = 6,94 <i>F</i> = 7,79
Брагин	E + C = 3,33 E = 3,16 W = 2,56	<i>t</i> = 1,19 <i>F</i> = 1,77	<i>t</i> = 5,33 <i>F</i> = 1,36	<i>t</i> = 4,27 <i>F</i> = 1,30

Метеостанция	Средняя скорость	Форма циркуляции		
		E + C / E	E + C / W	E / W
Василевичи	E + C = 3,16 E = 2,48 W = 1,97	<i>t</i> = <b>6,59</b> <i>F</i> = <b>2,69</b>	<i>t</i> = <b>14,10</b> <i>F</i> = 1,69	<i>t</i> = <b>5,73</b> <i>F</i> = <b>4,54</b>
Гомель	E + C = 3,98 E = 3,03 W = 2,41	<i>t</i> = <b>5,00</b> <i>F</i> = <b>3,39</b>	<i>t</i> = <b>10,88</b> <i>F</i> = 1,76	<i>t</i> = <b>3,75</b> <i>F</i> = <b>5,97</b>
Гродно	E + C = 3,61 E = 3,79 W = 3,60	<i>t</i> = 1,60 <i>F</i> = 1,09	<i>t</i> = 0,01 <i>F</i> = 1,02	<i>t</i> = <b>1,81</b> <i>F</i> = 1,07
Лида	E + C = 3,72 E = 3,05 W = 2,70	<i>t</i> = <b>5,12</b> <i>F</i> = <b>8,04</b>	<i>t</i> = <b>9,95</b> <i>F</i> = <b>2,45</b>	<i>t</i> = <b>2,39</b> <i>F</i> = <b>3,28</b>
Новогрудок	E + C = 3,94 E = 3,90 W = 3,63	<i>t</i> = 0,49 <i>F</i> = 2,05	<i>t</i> = <b>2,64</b> <i>F</i> = 1,87	<i>t</i> = <b>2,35</b> <i>F</i> = 1,10
Марьина Горка	E + C = 4,10 E = 3,22 W = 2,96	<i>t</i> = <b>5,84</b> <i>F</i> = <b>9,95</b>	<i>t</i> = <b>12,67</b> <i>F</i> = 1,26	<i>t</i> = 1,72 <i>F</i> = <b>7,91</b>
Минск	E + C = 4,01 E = 2,64 W = 2,19	<i>t</i> = <b>7,61</b> <i>F</i> = 1,69	<i>t</i> = <b>11,92</b> <i>F</i> = <b>2,85</b>	<i>t</i> = <b>3,41</b> <i>F</i> = <b>4,82</b>
Горки	E + C = 4,12 E = 3,89 W = 3,39	<i>t</i> = <b>2,23</b> <i>F</i> = 1,64	<i>t</i> = <b>6,46</b> <i>F</i> = 1,52	<i>t</i> = <b>4,81</b> <i>F</i> = 1,08
Могилёв	E + C = 3,75 E = 3,86 W = 3,76	<i>t</i> = 1,06 <i>F</i> = 1,07	<i>t</i> = 0,13 <i>F</i> = 1,51	<i>t</i> = 1,21 <i>F</i> = 1,41
Верхнедвинск	E + C = 3,14 E = 3,04 W = 2,88	<i>t</i> = 0,94 <i>F</i> = 1,53	<i>t</i> = <b>2,31</b> <i>F</i> = 1,34	<i>t</i> = 1,62 <i>F</i> = <b>2,05</b>
Витебск	E + C = 4,23 E = 3,12 W = 2,50	<i>t</i> = <b>6,27</b> <i>F</i> = <b>14,76</b>	<i>t</i> = <b>15,52</b> <i>F</i> = <b>2,82</b>	<i>t</i> = <b>3,30</b> <i>F</i> = <b>5,24</b>
Полоцк	E + C = 4,10 E = 2,63 W = 2,47	<i>t</i> = <b>10,15</b> <i>F</i> = <b>2,67</b>	<i>t</i> = <b>12,57</b> <i>F</i> = 1,14	<i>t</i> = 1,23 <i>F</i> = 2,35
Шарковщина	E + C = 4,18 E = 3,14 W = 2,56	<i>t</i> = <b>6,26</b> <i>F</i> = <b>5,60</b>	<i>t</i> = <b>12,81</b> <i>F</i> = 1,45	<i>t</i> = <b>3,55</b> <i>F</i> = <b>3,85</b>

При мечани е. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые критерии.

Статистически значимые различия характера колебания скорости ветра между циркуляционными эпохами E + C и E, а также E и W наблюдаются в 58,82 % случаев, а между E + C и W они выражены значительно слабее и отмечаются только в 23,53 % случаев. На метеорологических станциях Брагин, Гродно, Новогрудок, Горки и Могилёв различий в характере колебаний не выявлено.

Для наглядного представления пространственного распределения поля скоростей ветра в различные циркуляционные эпохи нами с использованием программных средств QGIS 3.28.1 и SAGA GIS 7.8.2 построены картосхемы среднегодовых скоростей ветра для каждой эпохи (рис. 1). В ходе построения нами разработана единная цветовая шкала для всех картосхем, что позволяет более наглядно отразить полученные результаты.

Наибольшие скорости ветра характерны для меридиональной циркуляционной эпохи, когда для большей части территории Беларуси наиболее характерными являются среднегодовые скорости ветра от 3,81 до 4,20 м/с. В поле распределения скорости ветра максимальные значения отмечаются на северо-востоке республики, а минимальные скорости ветра – на крайнем севере и юго-востоке. При восточной форме циркуляции для Беларуси наиболее характерны скорости ветра от 3,01 до 3,60 м/с. При западной форме циркуляции для исследуемой территории наиболее характерны среднегодовые скорости ветра от 2,41 до 3,20 м/с. При этом поля среднегодовых скоростей ветра при восточной и западной формах атмосферной циркуляции схожи: максимальные значения отмечаются на западе и востоке страны, минимальные значения – на юго-востоке, и проходят полосой от центра к северу республики.

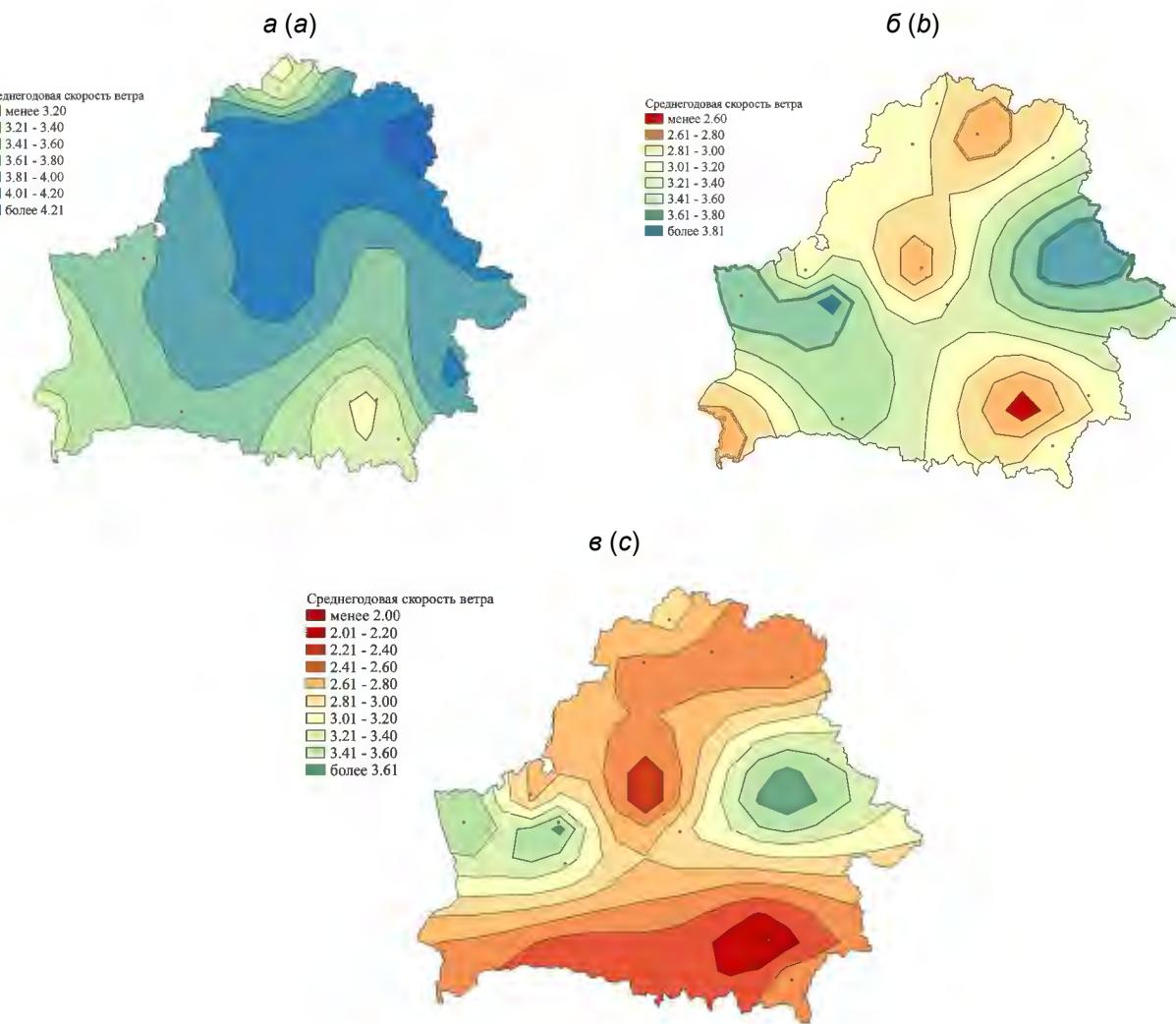


Рис. 1. Среднегодовые скорости ветра (м/с) осредненные за разные циркуляционные эпохи:  
а – Е + С; б – Е; в – В

Fig. 1. Average annual wind speeds (m/s) averaged over different circulation periods:  
a – E + C; b – E; c – W

В работах А. А. Гирса отмечено, что аномальное развитие определенной формы циркуляции особенно четко проявляется в одном или двух сезонах [13]. Основываясь на этом заключении, нами были выделены метеорологические станции с максимальными значениями  $t$ -критериев Стьюдента для каждой пары циркуляционных эпох и проведены исследования внутригодовой изменчивости данного показателя (табл. 2).

Таблица 2. Эмпирические значения  $t$ -критериев Стьюдента для среднесезонных скоростей ветра

Table 2. Empirical values of Student's  $t$ -tests for seasonal average wind speeds

Метеостанция	Е + С / Е	Е + С / В	Е / В
Брест	Зима $t = 5,76$ Весна $t = 6,22$ Лето $t = 6,84$ Осень $t = 5,25$	Различия не значимы	Различия не значимы
Полоцк	Зима $t = 10,05$ Весна $t = 6,88$ Лето $t = 9,51$ Осень $t = 7,97$	Различия не значимы	Различия не значимы

Метеостанция	E + C / E	E + C / W	E / W
Минск	Зима $t = 7,10$ Весна $t = 5,80$ Лето $t = 8,17$ Осень $t = 6,85$	Различия не значимы	Различия не значимы
Василевичи	Различия не значимы	Зима $t = 8,25$ Весна $t = 11,50$ Лето $t = 13,18$ Осень $t = 14,49$	Зима $t = 4,04$ Весна $t = 5,70$ Лето $t = 5,35$ Осень $t = 5,73$
Витебск	Различия не значимы	Зима $t = 11,22$ Весна $t = 12,17$ Лето $t = 12,41$ Осень $t = 13,33$	Различия не значимы
Шарковщина	Различия не значимы	Зима $t = 9,41$ Весна $t = 8,13$ Лето $t = 10,17$ Осень $t = 15,58$	Различия не значимы
Пинск	Различия не значимы	Различия не значимы	Зима $t = 6,42$ Весна $t = 6,85$ Лето $t = 6,43$ Осень $t = 6,95$
Горки	Различия не значимы	Различия не значимы	Зима $t = 2,16$ Весна $t = 4,09$ Лето $t = 4,82$ Осень $t = 5,33$

Примечание. Серым фоном выделены статистически незначимые различия.

Скорость ветра на территории республики имеет четкий внутригодовой ход скоростей, который не претерпевает изменений в различные циркуляционные эпохи. В холодный период года (декабрь – март) наблюдаются наибольшие скорости ветра. В последующие месяцы скорость ветра постепенно снижается, достигая наименьших значений в июль и августе. В дальнейшем скорость ветра постепенно увеличивается. Такой ход скорости ветра связан с циклонической деятельностью, которая усиливается в осенне-зимний период, а в конце лета глубина и повторяемость циклонических образований уменьшаются [14].

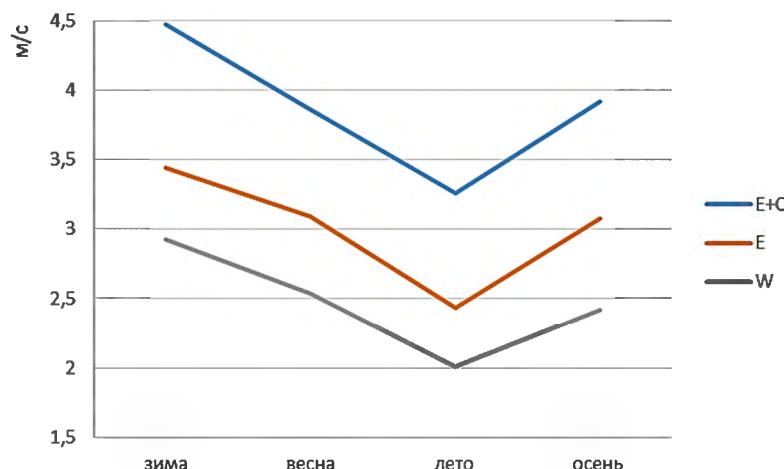


Рис. 2. Среднесезонные скорости ветра (м/с) циркуляционных эпох

Fig. 2. Seasonal average wind speeds (m/s) of circulation periods

Анализ эмпирических значений  $t$ -критериев Стьюдента для среднесезонных скоростей ветра показал, что максимальные статистически значимые различия между E + C и E циркуляционными эпохами приходятся, как правило, на летний период. Различия между эпохами E + C и W наиболее ярко выражены в осенний период. Наибольшие различия среднесезонных скоростей ветра между E и W циркуляционными эпохами отмечены в переходные сезоны (весна и осень), а наименьшие – зимой.

В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра по восьми румбам между Е + С и Е циркуляционными эпохами статистически значимые различия при уровне значимости  $\alpha = 5\%$  выделены для северного ветра в 17,65 % случаев, что является наименьшим показателем различия для данных эпох (табл. 3). Ветры с восточной составляющей имеют статистически значимые различия на уровне 43,00 %. Максимальные различия (70,59 %) наблюдаются для южного направления ветра, доля которого при восточной циркуляционной эпохе значительно увеличивается.

**Таблица 3. Обобщенные данные статистически значимых различий в эмпирических значениях *t*-критериев Стьюдента и *F*-критериев Фишера для среднегодовых скоростей ветра, % от общего числа случаев**

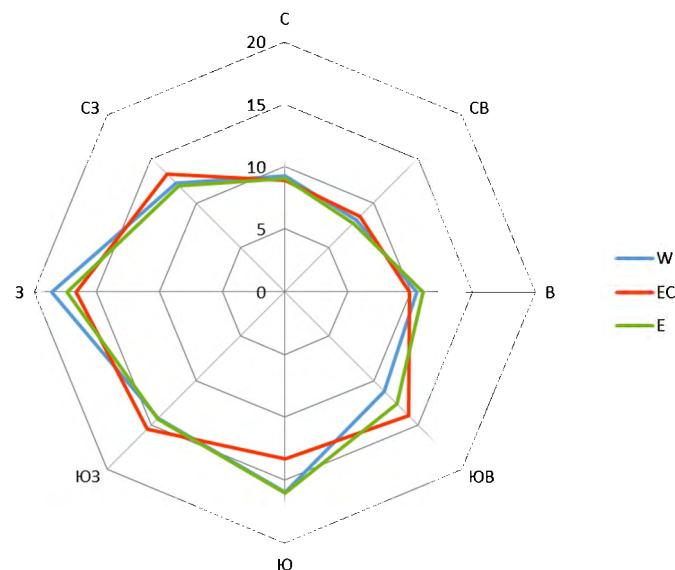
**Table 3. Summary of statistically significant differences in empirical values of Student's *t*-tests and Fisher's *F*-tests for average annual wind speeds, % of the total number of cases**

Форма циркуляции	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	С3
Е + С / Е	$t = 17,65$ $F = 17,65$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 0,00$	$t = 35,29$ $F = 35,29$	$t = 70,59$ $F = 41,18$	$t = 29,41$ $F = 17,65$	$t = 23,53$ $F = 5,88$	$t = 23,53$ $F = 5,88$
Е + С / В	$t = 35,29$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 76,47$ $F = 11,77$	$t = 82,35$ $F = 11,77$	$t = 41,18$ $F = 11,77$	$t = 52,94$ $F = 11,77$	$t = 52,94$ $F = 5,88$
Е / В	$t = 29,41$ $F = 0,00$	$t = 17,65$ $F = 11,77$	$t = 17,65$ $F = 11,77$	$t = 47,06$ $F = 23,53$	$t = 35,29$ $F = 11,77$	$t = 11,77$ $F = 23,53$	$t = 35,29$ $F = 0,00$	$t = 17,65$ $F = 17,65$

Различия в повторяемости направлений ветра более ярко выражены между Е + С и В эпохами. Наименьшие статистические различия характерны для северного направления, так же как и для Е + С эпох, но количественный показатель возрастает до 35,29 %. Максимальные статистически значимые различия характерны для юго-восточного (76,47 %) и южного (82,35 %) направлений. Так, в циркуляционную Е + С эпоху возрастает доля юго-восточных ветров, а при В циркуляции значительно увеличивается повторяемость южных ветров. Такое распределение характерно для всей территории Беларуси за исключением Восточно-Белорусской физико-географической провинции, где при В циркуляции отмечается увеличение доли западных ветров, что может быть обусловлено крайним восточным положением региона и, как следствие, ослаблением действия воздушных масс, поступающих с Атлантики.

Различия между изменчивостью направлений ветра между Е и В циркуляционными эпохами выражены слабее. Наиболее выражены изменения повторяемости юго-восточного направления ветра, доля которого увеличивается при Е циркуляции.

Статистически значимые различия характера колебания между циркуляционными эпохами выражены довольно слабо: 5,88–17,65 %. Наибольшие различия выявлены при смене эпохи Е + С на Е эпоху для юго-восточного (35,29 %) и южного (41,18 %) направлений (рис. 3).



**Рис. 3. Распределение повторяемости (%) направлений ветра за разные циркуляционные эпохи**

**Fig. 3. Distribution of frequency (%) of wind directions for different circulation periods**

Для более детального изучения межсезонных различий между направлениями ветра в разные циркуляционные эпохи нами отобраны юго-восточное и южное направления ветров, так как они подвержены максимальной изменчивости при смене циркуляционных эпох. Для метеорологических станций, где были установлены статистически значимые различия в изменении среднегодовых повторяемостей данных направлений при смене циркуляционных эпох, нами проведен анализ выборочных средних повторяемостей направлений ветра по сезонам года (табл. 4).

**Таблица 4. Эмпирические значения t-критериев Стьюдента для сезонных повторяемостей юго-восточного и южного направлений ветра**

**Table 4. Empirical values of Student's t-tests for seasonal frequencies of south-east and south wind directions**

Метеостанция	ЮВ			Ю		
	E + C / E	E + C / W	E / W	E + C / E	E + C / W	E / W
Барановичи	Различия не значимы	з = <b>1,71</b> в = 0,87 л = 1,53 о = 1,29	з = <b>2,33</b> в = 0,75 л = <b>3,07</b> о = 1,59	Различия не значимы	з = 0,64 в = <b>3,47</b> л = <b>1,83</b> о = <b>4,49</b>	з = 0,17 в = 0,77 л = 0,83 о = <b>2,00</b>
Брест	Различия не значимы	з = <b>2,63</b> в = 1,40 л = 0,37 о = 1,57	Различия не значимы	з = <b>2,40</b> в = <b>2,22</b> л = 0,35 о = <b>1,92</b>	з = 0,86 в = <b>2,37</b> л = 0,20 о = <b>2,51</b>	Различия не значимы
Пинск	з = <b>2,06</b> в = 0,98 л = 0,87 о = 0,40	з = <b>3,47</b> в = <b>1,79</b> л = <b>2,16</b> о = <b>1,73</b>	з = <b>1,98</b> в = 0,64 л = 1,32 о = 1,06	з = 1,65 в = 1,60 л = 1,49 о = 0,95	Различия не значимы	з = <b>2,34</b> в = 0,65 л = 1,58 о = 0,53
Брагин	Различия не значимы	з = <b>3,23</b> в = <b>3,19</b> л = <b>1,86</b> о = 1,56	з = <b>1,96</b> в = 1,61 л = 0,99 о = 1,38	Различия не значимы	з = <b>3,45</b> в = <b>2,71</b> л = <b>3,78</b> о = <b>3,63</b>	з = <b>2,46</b> в = 1,76 л = 0,21 о = 1,10
Василевичи	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы	з = <b>2,66</b> в = <b>1,91</b> л = <b>3,61</b> о = <b>3,07</b>	з = 0,05 в = 1,59 л = <b>1,70</b> о = 1,38	Различия не значимы
Гомель	Различия не значимы	з = <b>2,89</b> в = <b>2,05</b> л = 0,19 о = 1,44	Различия не значимы	Различия не значимы	з = <b>2,23</b> в = 1,68 л = <b>2,06</b> о = <b>1,75</b>	Различия не значимы
Гродно	Различия не значимы	з = 1,42 в = <b>1,87</b> л = 1,06 о = 1,33	Различия не значимы	з = <b>4,78</b> в = <b>8,05</b> л = <b>3,57</b> о = <b>4,20</b>	з = <b>5,14</b> в = <b>6,90</b> л = <b>2,92</b> о = <b>4,28</b>	Различия не значимы
Лида	Различия не значимы	з = <b>2,72</b> в = 1,11 л = 0,86 о = <b>2,55</b>	з = <b>1,76</b> в = 0,45 л = <b>2,58</b> о = 0,32	з = <b>4,14</b> в = <b>4,75</b> л = <b>2,06</b> о = <b>4,59</b>	з = <b>2,33</b> в = <b>2,58</b> л = 0,36 о = <b>3,28</b>	з = <b>2,01</b> в = <b>2,35</b> л = 1,64 о = 1,60
Новогрудок	Различия не значимы	з = <b>2,48</b> в = 1,58 л = 1,40 о = 1,24	Различия не значимы	з = <b>1,94</b> в = 1,46 л = <b>3,59</b> о = <b>2,18</b>	з = 0,38 в = <b>2,26</b> л = 1,57 о = <b>2,58</b>	Различия не значимы
Марьина Горка	з = <b>1,76</b> в = 1,29 л = 0,75 о = <b>2,40</b>	з = <b>2,24</b> в = 1,63 л = 1,64 о = <b>2,48</b>	Различия не значимы	з = <b>2,10</b> в = 0,81 л = 0,58 о = 1,65	з = 1,05 в = <b>1,78</b> л = 0,73 о = 1,05	Различия не значимы
Минск	з = <b>2,39</b> в = 1,31 л = 0,61 о = 1,64	з = <b>3,52</b> в = <b>2,11</b> л = <b>2,16</b> о = <b>2,44</b>	з = 1,34 в = 0,41 л = 1,66 о = 0,79	з = <b>1,88</b> в = 0,79 л = 0,25 о = <b>2,02</b>	з = <b>2,02</b> в = <b>2,83</b> л = 0,05 о = <b>3,39</b>	Различия не значимы
Горки	з = 0,23 в = 0,19 л = <b>2,27</b> о = 1,04	Различия не значимы	з = <b>2,01</b> в = 0,72 л = 0,53 о = 0,82	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 0,69 в = <b>3,07</b> л = 1,38 о = <b>2,00</b>

Метеостанция	ЮВ			Ю		
	E+C/E	E+C/W	E/W	E+C/E	E+C/W	E/W
Могилев	Различия не значимы	Различия не значимы	з = <b>2,08</b> в = 0,31 л = 0,77 о = 0,85	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы
Верхнедвинск	Различия не значимы	з = <b>2,19</b> в = 0,25 л = 0,34 о = 1,02	з = 1,59 в = 0,14 л = 0,42 о = 0,86	з = <b>3,58</b> в = 0,19 л = <b>2,22</b> о = <b>2,64</b>	з = <b>2,12</b> в = <b>2,22</b> л = 1,41 о = <b>3,29</b>	Различия не значимы
Витебск	з = <b>2,71</b> в = <b>1,90</b> л = <b>2,33</b> о = <b>3,26</b>	з = <b>6,40</b> в = <b>3,37</b> л = <b>4,87</b> о = <b>5,26</b>	Различия не значимы	з = <b>2,16</b> в = 1,68 л = <b>2,34</b> о = <b>2,25</b>	з = 1,04 в = <b>2,35</b> л = 0,98 о = <b>2,21</b>	Различия не значимы
Полоцк	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы	з = <b>1,89</b> в = <b>1,92</b> л = <b>3,03</b> о = <b>2,69</b>	з = <b>2,12</b> в = <b>3,17</b> л = <b>2,40</b> о = <b>5,16</b>	Различия не значимы
Шарковщина	з = <b>1,80</b> в = <b>1,76</b> л = <b>2,10</b> о = <b>2,41</b>	з = <b>2,16</b> в = 1,33 л = 1,14 о = <b>2,60</b>	Различия не значимы	з = <b>2,57</b> в = <b>2,51</b> л = 1,17 о = <b>2,00</b>	з = 0,49 в = <b>2,72</b> л = 0,19 о = <b>2,25</b>	з = <b>2,15</b> в = 0,21 л = <b>1,76</b> о = 0,11
Итого, %	з = 83,33 в = 33,33 л = 50,00 о = 50,00	з = 92,31 в = 46,15 л = 30,77 о = 38,46	з = 75,00 в = 0,00 л = 25,00 о = 0,00	з = 91,67 в = 50,00 л = 58,33 о = 83,33	з = 50,00 в = 85,71 л = 42,86 о = 85,71	з = 66,67 в = 33,33 л = 0,00 о = 33,33

**П р и м е ч а н и я.**

1. з – зима; в – весна; л – лето; о – осень.
2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые критерии.
3. Серым фоном выделены статистически незначимые различия.

В результате анализа выявлено, что при смене циркуляционных эпох наибольшие изменения в повторяемости юго-восточного направления ветра приходятся на зимний период (92,3–75,0 % случаев). Изменение повторяемости южного направления ветра имеет более сложную структуру. Так, при смене Е + С формы циркуляции на Е циркуляцию наибольшие изменения повторяемости южного ветра происходят в зимнее и осеннеое время (91,7 и 83,3 % соответственно), при смене Е + С формы циркуляции на W циркуляцию максимальные изменения происходят весной и осенью (85,7 %). При смене Е формы циркуляции на W циркуляцию можно отметить изменения южного ветра зимой (66,7 %).

**Выводы.**

1. В результате анализа выборочных средних среднегодовых скоростей ветра статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены между всеми циркуляционными эпохами. Статистически значимые различия характера колебания между Е + С и Е, а также Е и W циркуляционными эпохами наблюдаются в 58,82 % случаев, а между Е + С и W эпохами выражены значительно слабее.

2. Анализ изменчивости среднесезонных скоростей ветра показал, что максимальные различия между Е + С и Е циркуляционными эпохами приходятся на летний период. Различия между Е + С и W эпохами наиболее ярко выражены в осенний период, а между Е и W – в переходные сезоны (весна и осень).

3. В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра между Е + С и Е циркуляционными эпохами максимальные отличия отмечены для южного направления ветра. Более ярко выраженные различия в изменении направления ветра отмечены между Е + С и W эпохами, особенно для юго-восточных и южных ветров. Различия между изменчивостью направлений ветра между Е и W циркуляционными эпохами выражены слабо.

**Список использованных источников**

1. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Минск : Беларусь навука, 2017. – 179 с.
2. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата и их доказательная база / В. Ф. Логинов // Наука и инновации. – 2011. – № 4. – С. 5–9.

3. Боков, В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата / В. Н. Боков, В. Н. Воробьев // Ученые записки Российской государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 13. – С. 83–88.
4. Прохорова, У. В. Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген / У. В. Прохорова, П. Н. Священников, Б. В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 4 (114). – С. 47–56. – URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56> (дата обращения: 28.10.2024).
5. Климатология / О. А. Дроздов, В. А. Васильев, Н. В. Кобышева [и др.]. – Л. : Гидрометеоиздат, 1989. – 586 с.
6. Барашкова, Н. К. Классификация форм атмосферной циркуляции / Н. К. Барашкова, И. В. Кужевская, Д. В. Поляков. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2015. – 124 с.
7. Вангенгейм, Г. Я. Материалы для построения синоптических методов характеристики климата / Г. Я. Вангенгейм // Известия Главной геофизической обсерватории. – 1933. – № 2–3. – С. 3–16.
8. Гирс, А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеоиздат, 1974. – 488 с.
9. Гирс, А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеоиздат, 1971. – 280 с.
10. Волчек, А. А. Колебания годового стока воды р. Припять – г. Мозырь / А. А. Волчек // ICEP – 2023. Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», посвящ. памяти доцента кафедры природообустройства, канд. географ. наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 окт. 2023 г. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест : БГТУ, 2023. – С. 14–29.
11. Кононова, Н. К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1988–2017 гг. / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 108–123.
12. Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Брест : Изд-во БГТУ, 2004. – 301 с.
13. Гирс, А. А. Особенности внутригодовых преобразований макросиноптических процессов в различных циркуляционных эпохах / А. А. Гирс // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. – 1963. – Т. 283. – С. 33–56.
14. Волчек, А. А. Колебания скорости ветра на территории Беларуси на рубеже XX–XXI столетий / А. А. Волчек, А. В. Гречаник // Актуальные проблемы наук о Земле: исследование трансграничных регионов : сб. Материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г. : в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БГГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 201–204.

## References

1. Loginov V. F. *Izmeneniya klimata: trendy, cikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 179 p. (in Russian)
2. Loginov V. F. *Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata i ikh dokazatel'naya baza* [Global and regional climate changes and their evidence base]. Nauka i innovacii = Science and Innovation, 2011, no. 4, pp. 5–9. (in Russian)
3. Bokov V. N. Vorob'ev V. N. *Izmenchivost' atmosfernoj cirkulyacii i izmenenie klimata* [Atmospheric circulation variability and climate change]. Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University, 2010, no. 13, pp. 83–88. (in Russian)
4. Prokhorova U. V., Svyaschennikov P. N., Ivanov B. V. *Issledovanie vremennoj izmenchivosti harakteristik atmosfernoj cirkulyacii v rajone arhiva Shpicbergen* [Study of temporal variability of atmospheric circulation characteristics in the region of the Spitsbergen archipelago]. Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic, 2017, no. 4 (114), pp. 47–56. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56> (accessed 28 October 2024). (in Russian)
5. Drozdov O. A., Vasil'ev V. A., Kobysheva N. V., Raevskij A. N., Smekalova L. K., Shkol'nyj E. P. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 586 p. (in Russian)
6. Barashkova N. K., Kuzhevskaya I. V., Polyakov D. V. *Klassifikaciya form atmosfernoj cirkulyacii* [Classification of atmospheric circulation forms]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2015, 124 p. (in Russian)
7. Vangengejm G. Ya. *Materialy dlya postroeniya sinopticheskikh metodov harakteristiki klimata* [Materials for the construction of synoptic methods for climate characterization]. Izvestiya Glavnoj geofizicheskoy observatorii = News of the Main Geophysical Observatory, 1933, no. 2–3, pp. 3–16. (in Russian)
8. Girs A. A. *Makrocirkulyacionnyj metod dolgosrochnyh meteorologicheskikh prognozov* [Macrocirculation method of long-term meteorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 488 p. (in Russian)
9. Girs A. A. *Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoj cirkulyacii i dolgosrochnye gidrome-teorologicheskie prognozy* [Long-term variations in atmospheric circulation and long-term hydrometeorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971, 280 p. (in Russian)
10. Volchek A. A. *Kolebaniya godovogo stoka vody r. Pripyat' – g. Mozyr'* [Fluctuations in the annual water flow of the river Pripyat – Mozyr]. ICEP – 2023. Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Vodoohozajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy" ["ICEP – 2023. Actual scientific, technical and environmental problems

- of habitat conservation". Proc. Int. sci. and pract. conf. "Water management construction and environmental protection"]. Brest, 2023, pp. 14–29. (in Russian)
11. Kononova N. K. *Tipy global'noj cirkulyacii atmosfery: rezul'taty monitoringa i retrospektivnoj ocenki za 1988–2017 gody* [Global atmospheric circulation types: results of monitoring and retrospective assessment for 1988–2017]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2018, no. 3, pp. 108–123. (in Russian)
12. Loginov V. F., Volchek A. A., Shvedovskij P. V. *Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnyh processov* [Practice of applying statistical methods in the analysis and forecasting of natural processes]. Brest, BGTU Publ., 2004, 301 p. (in Russian)
13. Girs A. A. *Osobennosti vnutrigodovyh preobrazovanij makrosinopticheskikh processov v razlichnyh cirkulyacionnyh epohah* [Features of intra annual transformations of macrosynoptic processes in different circulation epochs]. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* [Proc. of the Arctic and Antarctic Research Institute], 1963, no. 283, pp. 33–56. (in Russian)
14. Volchek A. A., Grechanik A. V. *Kolebaniya skorosti vetra na territorii Belarusi na rubezhe XX–XXI stoletij* [Wind speed variations in Belarus at the turn of the 20th–21st centuries]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovanie transgranichnyh regionov. Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the IV Int. Sci. and Pract. Conf. "Research of Transboundary Regions"]. Brest, 2019, part 1, pp. 201–204. (in Russian)

### Информация об авторах

Волчек Александр Александрович – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: Volchak@tut.by

Гречаник Алёна Васильевна – магистр географических наук, исследователь, преподаватель кафедры городского и регионального развития, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (б-р Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь). E-mail: HrachanikA@tut.by

### Information about the authors

Alexander A. Volchek – Dr. Sc. (Geography), Professor, Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: Volchak@tut.by

Aliona V. Hrachanik – Master of geographical sciences, Researcher, Lecturer of the Department of Urban and Regional Development, Brest State A. S. Pushkin University (Cosmonauts Boulevard, 21, 224016, Brest, Belarus). E-mail: HrachanikA@tut.by