

- тельство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 93–99.
<https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-93-99>
3. Справочник по климату Беларуси. Часть 5. Влажность воздуха. Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости; под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – 48 с.
 4. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2019 гг.
 5. Пашинский, В. А. Оценка падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории в условиях Республики Беларусь / В. А. Пашинский, А. А. Бутько, А. А. Черкасова // Экологический вестник. – 2015. – № 2 (32). – С. 77–82.
 6. Meshyk, A., Barushka, M., Marozava, V., Sarkynov, E., & Meshyk, A. (2020). Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus. In E3S Web of Conferences (Vol. 212, p. 01012). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201012>
 7. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли ; под ред. Ф. И. Ерешко. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 400 с.
 8. Мешик, О. П. Эффективность работы гелиосистем (на примере климатических условий Беларуси) / О. П. Мешик, К. О. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // ICER – 2021. Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Брестского государственного технического университета и 50-летию факультета инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред.: А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 235–245.

УДК 551.55 (476)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова, А. С. Протасевич, К. О. Мешик

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
omeshyk@gmail.com

Аннотация

Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости характеристик ветрового режима территории Республики Беларусь. Выявлены статически значимые трансформации скоростей и направлений ветра за последний 40-летний период. Развитие ветроэнергетики в Беларуси является целесообразным.

Ключевые слова: ветер, ветровой режим, Беларусь, пространственно-временная изменчивость, ветроэнергетический потенциал.

ESTIMATION OF THE WIND POWER POTENTIAL OF THE TERRITORY OF BELARUS

A. P. Meshyk, M. V. Barushka, V. A. Marozava, A. S. Pratasevich, K. A. Meshyk
Abstract

The paper presents an analysis of time-space variability of wind regime characteristics on the territory of the Republic of Belarus. The research has revealed some statistically significant transformations in wind velocity and direction observed in the past 40 years. It is concluded that it makes sense to develop wind power industry in the area.

Keywords: wind, wind regime, Belarus, time-space variability, wind power potential.

Введение. Ветер, как источник энергии, использовался человеком с древнейших времен. Энергия ветра применялась в домашнем быту, сельском хозяйстве, мореплавании вплоть до появления первой паровой машины [1]. У энергии ветра есть ряд неоспоримых достоинств: неисчерпаемость, доступность из любой точки мира, универсальность (способность преобразовывать механическую энергию в электрическую), бесплатность и экологичность.

На территории Республики Беларусь развитие альтернативных источников энергии, таких как солнечная и ветровая, началось с середины 90-х гг. Предпосылки к изучению и развитию ветроэнергетики в стране появились относительно давно, так как была необходимость в диверсификации энергоисточников [2]. В настоящее время в Беларуси доля, приходящаяся на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) составляет 5,1 %. Согласно Концепции энергетической безопасности к 2035 году запланировано довести показатель использования возобновляемой энергии до 9 % от валового потребления энергии [3].

Для обоснования целесообразности развития и применения ветроэнергетики на конкретных территориях следует оценить следующие характеристики: фактор рельефообразования территории, скорость и направление ветра.

Целью данной работы является оценка составляющих ветроэнергетического потенциала территории Республики Беларусь в контексте анализа метеорологических характеристик исследуемой территории. Основными задачами является анализ ветрового режима территории страны, исследование пространственно-временной изменчивости метеорологических характеристик, представляющих собой скорость и направление ветра, картографирование территории Беларуси, по характеристикам определяющим потенциал развития ветроэнергетики.

Материалы и методы. В настоящем исследовании использованы материалы государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», характеризующие ветровой режим территории Беларуси. Временные ряды за репрезентативный 40-летний период 1981-2020 гг. приняты по 18 метеостанциям в соответствии с данными климатического кадастра

Республики Беларусь, публикуемыми в соответствующих метеорологических ежемесячниках [4].

В работе реализованы методы статистической обработки экспериментальных данных, в частности анализ временных рядов, пространственное обобщение метеорологической информации и др., использованы методы картографирования.

Результаты и обсуждение. Ветер, как объект исследования, характеризуется значительной изменчивостью во времени и пространстве. По ряду метеостанций максимальные скорости ветра превышают 30 м/с. В таблице 1 представлены ранжированные значения максимальных скоростей ветра на территории Беларуси.

Таблица 1– Ранжированные максимальные скорости ветра за 1981–2020 гг.

Скорость ветра, м/с	Месяц	Год	Метеостанция
32	июнь	1998	Горки
30	март	2002	Костюковичи
30	январь	2005	Ошмяны
29	июль	2019	Пинск
29	июль	2010	Новогрудок
28	декабрь	1999	Барановичи
28	июль	1988	Могилев
27	январь	1993	Гродно
27	ноябрь	1988	Брест
27	сентябрь	1998	Гомель

Максимальное значение скорости ветра – 32 м/с было зарегистрировано в июне 1998 года на метеорологической станции Горки. Преимущественно максимальные скорости ветра наблюдаются в осенне-зимний период на метеостанциях, расположенных на востоке и западе страны. На остальной части Беларуси ветровые аномалии минимизированы, что вероятно связано с орографическими особенностями исследуемой территории.

На рисунке 1 представлен внутригодовой ход среднегодовых скоростей ветра по отдельным метеостанциям Беларуси.

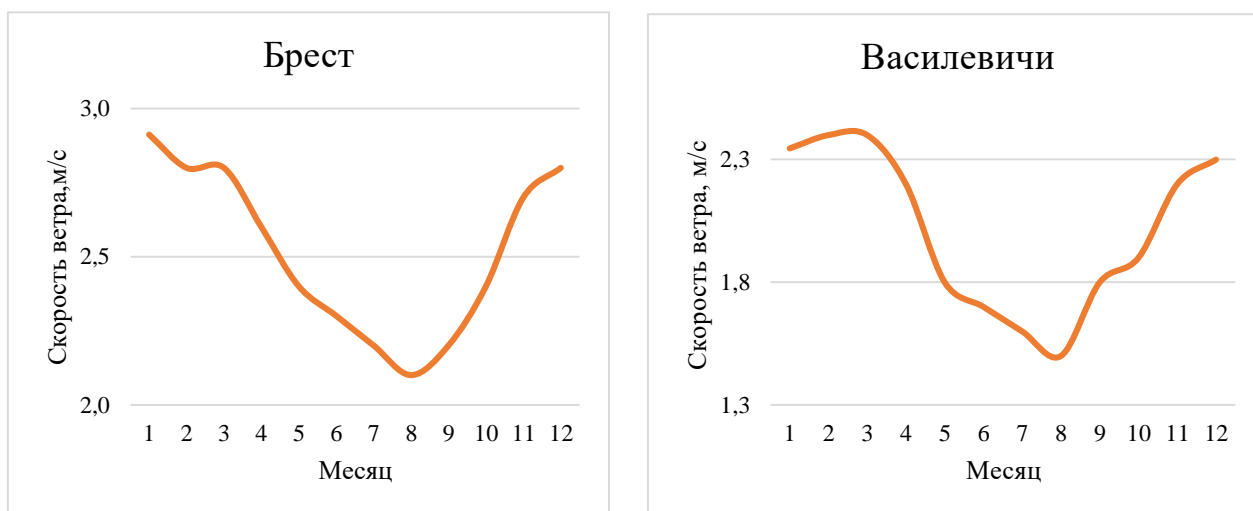


Рисунок 1 – Внутригодовой ход среднегодовых скоростей ветра за период с 1981-2020 гг., м/с

Из рисунка 1 видно, что минимальные скорости ветра приходятся на теплый период года, а максимумы соответствуют холодному периоду, с довольно резким увеличением скорости ветра с октября вплоть до февраля. Эффективность ветроэнергетического потенциала является противоположной гелиоэнергетическому, когда генерация энергии Солнца максимальная летом. Это создает предпосылки совместного использования энергии ветра и Солнца в малых энергетических проектах.

На рисунке 2 представлена динамика пространственно-временной изменчивости среднегодовых скоростей ветра за исследуемый период (1981-2020 гг.), которая позволяет выявить трендовую составляющую.

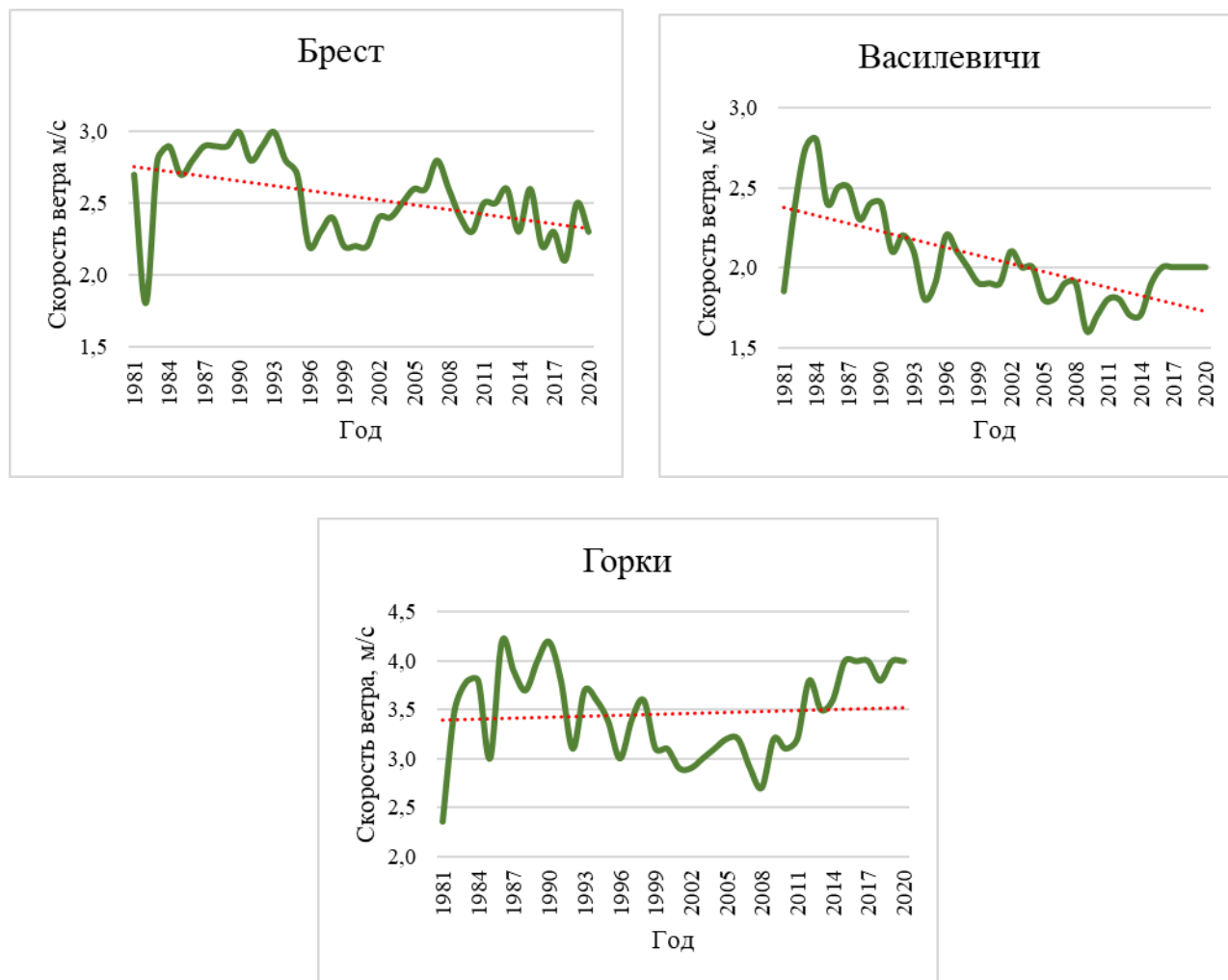


Рисунок 2 – Динамика среднегодовых скоростей ветра за исследуемый репрезентативный период (1981-2020 гг.)

На всех метеостанциях имеют место отрицательные тренды, за исключением Горок, что позволяет сделать вывод о снижении скоростей ветра по всей территории Беларуси, а в качестве причин следует отметить общепланетарные процессы и увеличение шероховатости подстилающей поверхности вблизи метеоплощадок (застройка, зарастание древесно-кустарниковой растительностью), в качестве примера на рисунке 3 приведено окружение метеостанции Брест.

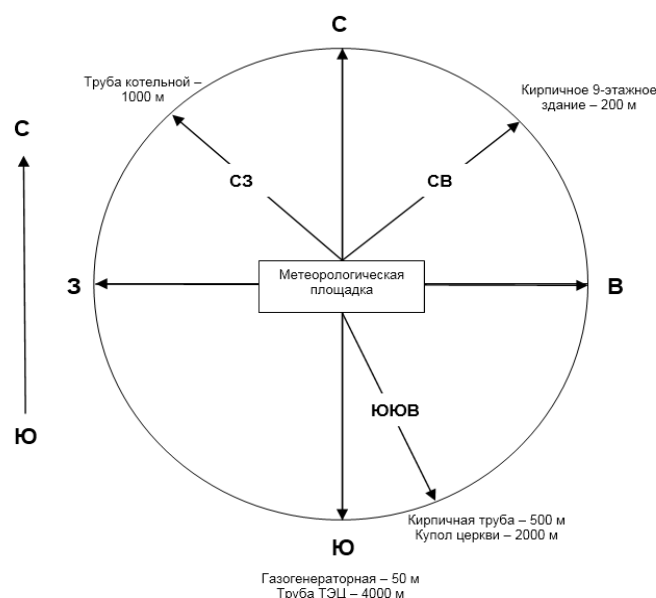


Рисунок 3 – Близлежащие инженерно-технические сооружения (метеостанция Брест)

Анализ временных рядов (1981-2020 гг.) средних годовых значений скоростей ветра указывает на их ярко выраженную цикличность. Цикличность нами устанавливается методом скользящих средних. В установленной цикличности явно отражаются закономерности внутритерриториального пространственного распределения скоростей ветра. Наблюдаются достаточно синхронные колебания во времени как для областей, так и для Беларуси в целом. В таблице 2 приведены уравнения линейных трендов для ряда метеостанций Беларуси. Как уже было сказано, практически по всей территории Беларуси имеют место отрицательные тренды. Скорости ветра уменьшаются с динамикой за 10 лет от 0,08 м/с в Бресте до 0,37 м/с в Витебске.

Таблица 2 – Линейные тренды изменения средних значений скоростей ветра, м/с

Метеостанция	Уравнение линейной регрессии
Барановичи	$V = -0,016t + 3,43$
Брест	$V = -0,008t + 2,69$
Пинск	$V = -0,036t + 3,22$
Верхнедвинск	$V = -0,030t + 3,61$
Витебск	$V = -0,037t + 3,26$
Орша	$V = -0,017t + 3,36$
Василевичи	$V = -0,017t + 2,43$
Гомель	$V = -0,034t + 3,07$
Октябрь	$V = -0,016t + 3,11$
Гродно	$V = -0,030t + 4,29$
Новогрудок	$V = -0,013t + 3,84$
Ошмяны	$V = -0,010t + 3,62$
Березино	$V = -0,009t + 2,48$
Марьино Горка	$V = -0,019t + 3,14$
Минск	$V = -0,037t + 3,02$
Горки	$V = 0,004t + 3,31$
Костюковичи	$V = -0,031t + 4,14$
Могилев	$V = -0,023t + 4,21$

Для оценки трансформации ветрового режима выполнена его дифференцированная оценка по десятилетним периодам. В таблице 3 представлены среднегодовые скорости ветра по областным центрам Беларуси за рассматриваемый репрезентативный период по десятилетиям (1981-1990 гг., 1991-2000 гг., 2001-2010 гг., 2011-2020 гг.).

Таблица 3 – Среднегодовые скорости ветра по десятилетиям (1981-1990 гг., 1991-2000 гг., 2001-2010 гг., 2011-2020 гг.), м/с

Метеостанция	Повторяемость и скорость ветра по 8 румбам																	
	Сред. значение	Макс. значение	С		СВ		В		ЮВ		Ю		ЮЗ		З		СЗ	
			П	С	П	С	П	С	П	С	П	С	П	С	П	С		
БРЕСТ																		
ГОДОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ																		
1981-1990	2,7	21,5	7,1	2,5	5,6	2,4	10,2	2,7	9,2	2,8	13,0	2,7	13,7	2,9	18,6	3,3	8,6	3,0
1991-2000	2,6	19	8,4	2,3	6,1	2,1	14,7	2,6	10,5	2,7	13,2	2,5	15,7	2,7	20,6	3,0	10,9	2,9
2001-2010	2,5	20,0	8,7	2,4	7,7	2,3	13,9	2,6	11,6	2,6	12,2	2,3	14,5	2,6	19,4	3,0	12,0	2,8
2011-2020	2,4	19,9	8,3	2,1	6,6	2,1	13,7	2,5	10,6	2,5	12,1	2,4	14,4	2,6	17,7	3,0	11,2	2,8
ВИТЕБСК																		
1981-1990	3,0	21	5,4	2,5	6,8	2,9	7,0	3,1	13,7	3,5	16,9	3,6	12,9	3,9	15,6	2,9	6,8	2,2
1991-2000	2,7	19,9	7,8	2,6	8,2	2,1	8,6	2,4	8,5	2,9	18,0	3,2	18,3	3,0	21,7	2,8	7,7	2,5
2001-2010	2,2	18,7	9,6	2,3	10,7	2,0	5,9	2,0	7,1	2,3	21,7	2,7	20,2	2,8	17,9	2,5	6,9	2,2
2011-2020	2,0	19,8	9,1	2,2	11,7	1,8	3,9	1,6	4,5	1,7	21,8	2,4	20,4	2,5	15,7	2,3	6,5	2,1
ГОМЕЛЬ																		
1981-1990	2,9	19	7,0	2,9	7,7	2,6	10,1	2,8	9,0	3,2	15,2	3,5	12,6	3,2	11,3	3,4	11,7	3,0
1991-2000	2,5	20,8	9,3	2,6	9,9	2,1	13,1	2,4	10,9	3,1	16,3	3,0	13,8	2,7	12,0	3,0	14,5	2,9
2001-2010	2,1	18,9	12,8	2,2	6,0	1,7	11,3	1,9	11,5	2,4	18,9	2,6	12,6	2,3	12,7	2,7	14,2	2,6
2011-2020	2,0	19,3	11,6	2,2	6,0	1,5	10,7	1,7	11,3	2,1	15,7	2,5	14,1	2,1	10,0	2,6	14,3	2,6
ГРОДНО																		
1981-1990	4,2	22,7	8,5	4,3	3,2	3,8	6,0	4,0	10,3	4,5	13,6	4,4	11,5	4,6	22,6	5,4	10,7	5,1
1991-2000	3,8	22,5	9,8	3,5	6,4	3,3	7,8	3,7	11,6	4,3	15,1	4,0	13,0	4,1	19,5	4,2	14,2	4,7
2001-2010	3,2	20,6	12,1	3,6	6,0	3,3	8,2	3,5	11,9	3,9	17,7	3,6	12,3	3,7	20,7	4,2	11,5	4,2
2011-2020	3,5	18,3	10,2	3,5	6,0	3,1	8,3	3,4	10,2	3,8	17,4	3,5	12,2	3,8	17,8	4,3	11,6	4,2
МИНСК																		
1981-1990	2,8	18,5	7	2,7	5,8	2,5	9,3	3	10,6	3,1	14	3,1	11,6	3	15,8	2,7	11,9	2,6
1991-2000	2,3	18,1	9,6	2,3	8,6	2,3	9,5	2,3	11	2,5	16,1	2,4	12,9	2,2	16,7	2,3	15,5	2,5
2001-2010	2,0	18,1	11,2	2,2	9,2	2,5	9,8	2,3	9,3	2,4	16,5	2,5	14,2	2,3	16,2	2,1	14,0	2,0
2011-2020	1,8	17,1	9,5	1,8	7,0	1,8	10,9	1,9	9,6	2,2	15,5	2,4	12,3	2,4	17,8	2,1	12,6	2,0
МОГИЛЕВ																		
1981-1990	4,0	22,7	8,1	3,8	5,8	3,5	6,0	3,5	11,1	3,9	14,2	4,3	12,0	4,3	18,2	4,5	10,5	4,6
1991-2000	3,9	21,5	8,6	4,1	8,0	3,4	8,5	3,6	11,9	3,8	16,2	4,4	13,4	4,3	18,7	4,4	13,1	4,4
2001-2010	3,6	22,5	9,5	3,5	8,4	3,3	7,5	3,3	14,9	3,7	16,7	4,0	13,0	4,1	18,5	4,3	11,5	4,4
2011-2020	3,2	20,9	9,2	3,0	7,7	2,7	7,5	2,7	14,5	3,2	13,3	3,6	11,1	3,5	17,8	3,8	11,9	4,0

Анализ таблицы 3 показывает, что между смежными десятилетиями происходит уменьшение скоростей ветра на 10-13 %. Данная тенденция для территории Беларуси носит массовый характер и представляет собой проблему для развития ветроэнергетики.

Наряду со скоростями ветра претерпела изменчивость и его повторяемость. Наглядным подтверждением является рисунок 4, характеризующий данные по метеостанции Витебск.

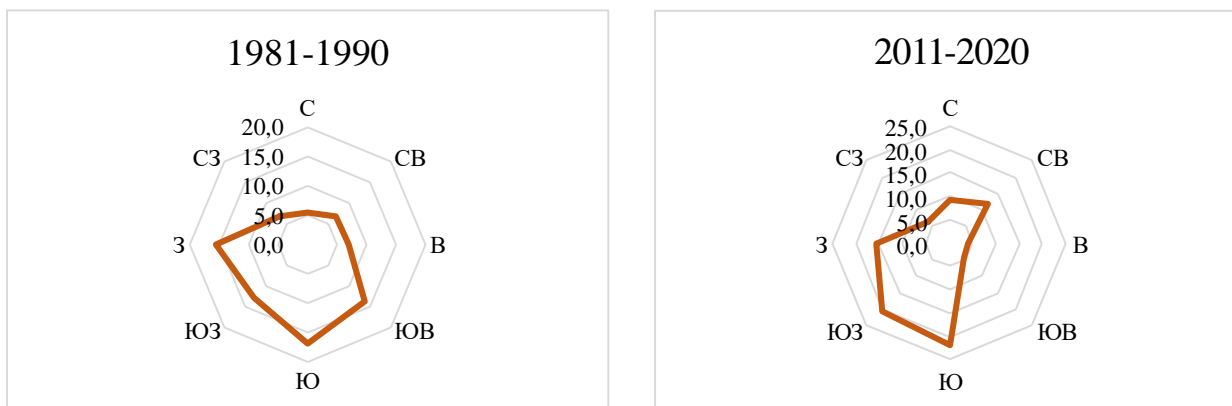


Рисунок 4 – Повторяемость и направление ветра за годовой период на метеостанции Витебск

Если ранее по всей территории Беларуси преобладали ветры западных направлений, то в начале XXI века направления ветров носят разнонаправленный характер и определяются изменившейся орографией.

Выявить районы на территории Беларуси, обладающие высоким ветроэнергетическим потенциалом, позволяет картографирование. Скорость ветра здесь выступает ведущим фактором. На рисунке 5 представлено пространственное распределение среднемноголетних скоростей ветра в отдельные периоды года.

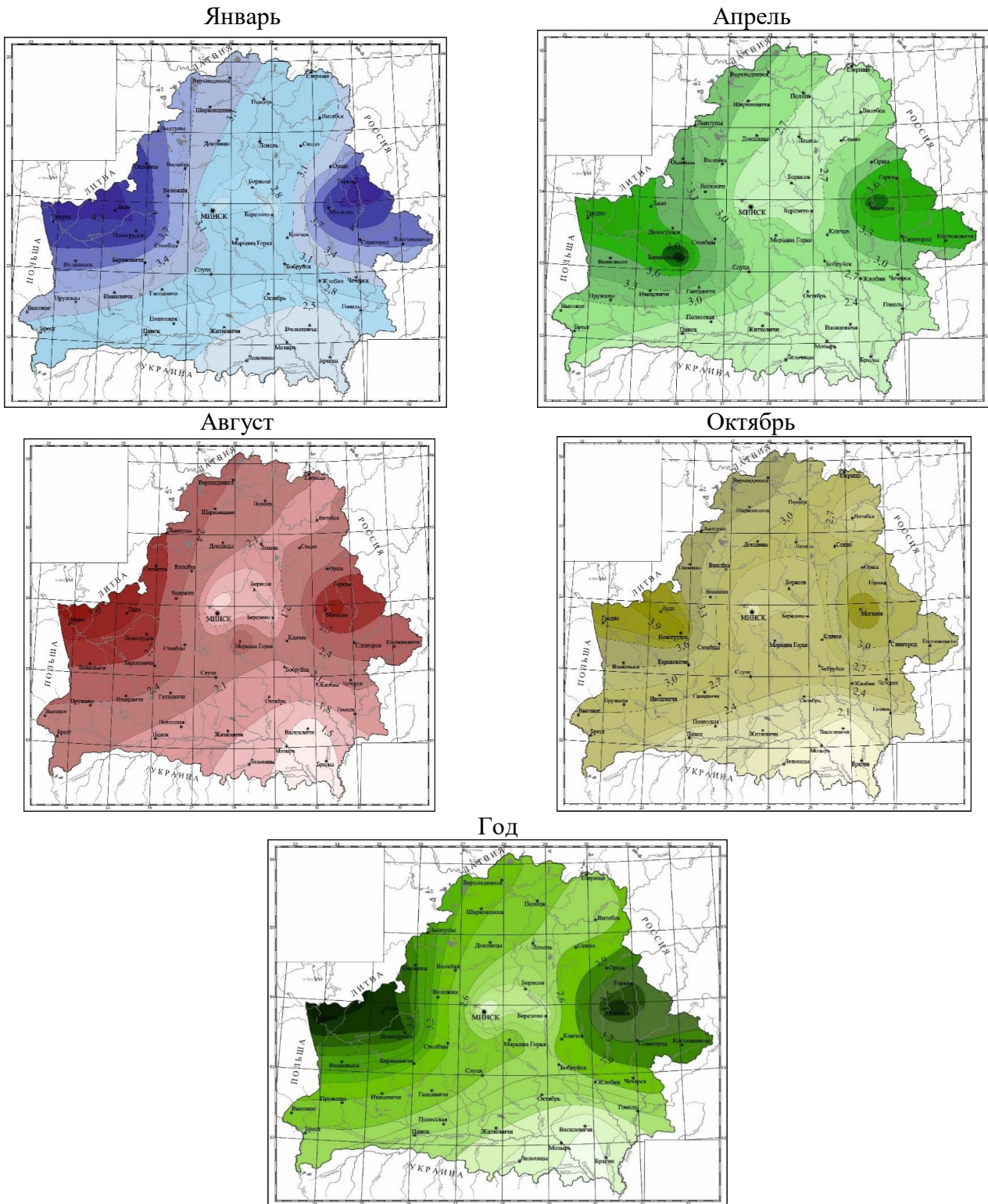


Рисунок 5 – Распределение скоростей ветра на территории Беларуси за рассматриваемый период

Как показывает рисунок 5, наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладает западная и восточная части Беларуси. Именно в этих районах среднегодовые скорости ветра превышают 3,0 м/с, что для большинства ветроэнергетических установок (ВЭУ) данная скорость является минимально допустимой (стартовой). В тоже время, необходимо корректировать скорости ветра относительно высоты ротора ВЭУ и учитывать шероховатость подстилающей земной поверхности. Отмечается, что основными факторами влияния топографии местности на параметры ветра являются, затенение объекта препятствиями, шероховатость подстилающей поверхности земли и орография местности.

Территория Беларуси по особенностям рельефа разделена на четыре типа, каждый из которых характеризуется своими элементами шероховатости и может быть отнесен к определенному классу [5].

Классу 0 (поверхность воды) соответствует поверхности водохранилищ и озер. Размер шероховатости $z_0 = 0,0002$ м.

Классу 1 соответствуют открытые области с небольшими лесозащитными полосами (равнины или небольшие холмы). Могут быть фермерские постройки, отдельно стоящие деревья или кустарники. Размер шероховатости $z_0 = 0,03$ м.

Классу 2 соответствуют территории хозяйственных земель с небольшими лесозащитными лесополосами, среднее расстояние между которыми составляет 1000 м, с разбросанными областями построек. Территория характеризуется большими открытыми областями между лесополосами, придающими ландшафту открытый внешний вид. Территория может быть ровной или немного холмистой, на ней могут быть многочисленные деревья и постройки. Размер шероховатости $z_0 = 0,10$ м.

Классу 3 соответствуют территории с городскими застройками, лесом или сельскохозяйственные земли с многочисленными лесополосами. Сельскохозяйственные угодья характеризуются частыми и близкорасположенными лесополосами, среднее расстояние между которыми составляет несколько сотен метров. Леса и городские застройки также принадлежат к этому классу. Размер шероховатости составляет $z_0 = 0,40$ м.

Для характеристики профиля ветра ниже градиентного уровня предложены различные математические зависимости (степенная, логарифмическая и др.). Наиболее распространена степенная (E. Deacon, H. Tennekes, Deaves & Harris) зависимость скорости ветра с высотой z [6]

$$V(z) = V_a * (z/z_a)^\alpha, \quad (1)$$

где V_a – скорость ветра на высоте анемометра или другого измерительного прибора; z_a – высота анемометра или другого измерительного прибора, чаще около 10 м; α – показатель степени.

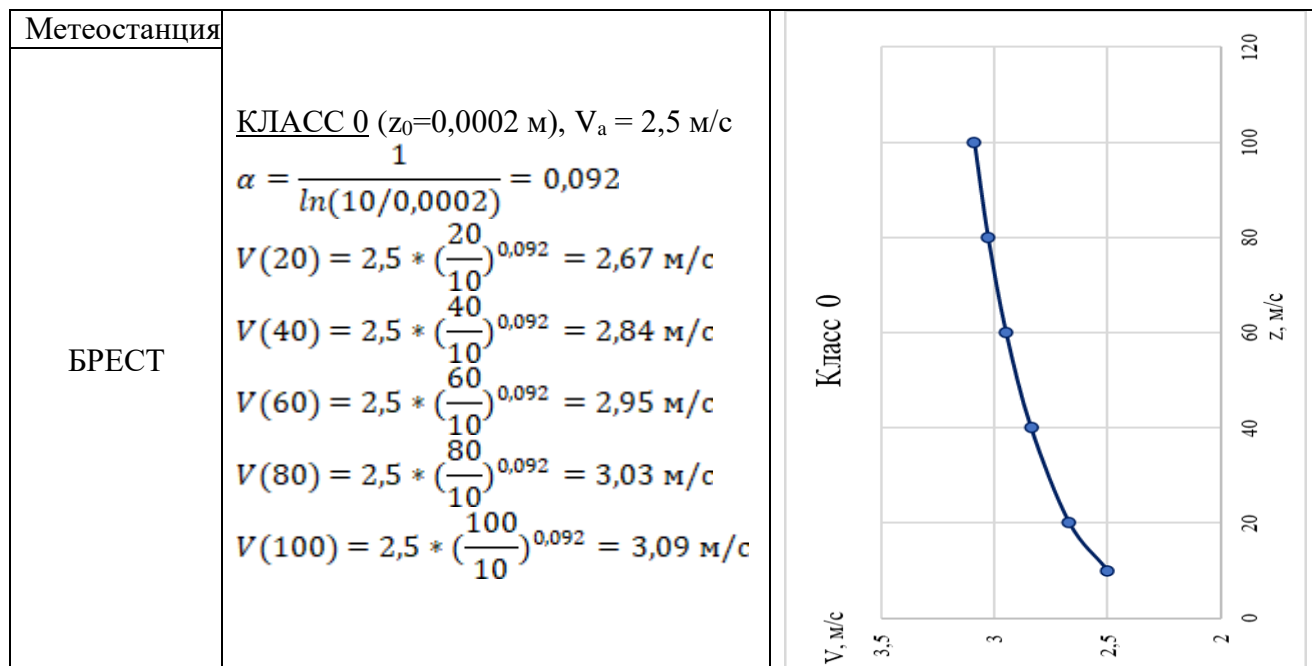
Между степенным и логарифмическим законами описания вертикальных профилей скоростей ветра существует следующая зависимость

$$\alpha = \frac{1}{\ln(z_a/z_0)}, \quad (2)$$

где z_0 – шероховатость поверхности.

Результаты расчетов приведены в таблице 4. В качестве примера представлены метеостанция Брест и класс шероховатости 0.

Таблица 4 – Результаты расчета скорости ветра в зависимости от высоты



Результаты расчетов позволяют установить оптимальную высоту оси ротора ВЭУ для конкретной территории. Вообще для строительства ВЭУ предпочтительной является местность с отсутствием прилегающих вышестоящих гор, высоких деревьев, построек и т.д.

В таблице 5 представлены результаты расчета коэффициентов возрастания средней скорости ветра с высотой для различных классов шероховатости земной поверхности для метеостанции Брест.

Таблица 5 – Коэффициент возрастания средней скорости ветра с высотой для различных классов шероховатости земной поверхности

Класс	Брест					
	Высота, м					
	10	20	40	60	80	100
0	1	1,08	1,12	1,20	1,20	1,24
1	1	1,12	1,28	1,36	1,44	1,48
2	1	1,16	1,36	1,48	1,56	1,64
3	1	1,24	1,52	1,76	1,92	2,04

Анализ результатов таблицы 5 показывает, что на высоте 60-80 м средняя скорость ветра возрастает до 1,5-2,0 раз в зависимости от класса шероховатости. ВЭУ большой мощности с такой высотой мачты будут наиболее эффективны и производительней, чем ВЭУ малой мощности, расположенной на высоте флюгера (10 м).

Заключение. В результате выполнения работы получены следующие выводы: 1. В установленной цикличности объективно отражаются закономерности внутритерриториального пространственного распределения скоростей ветра. Наблюдаются достаточно синхронные колебания во времени

значений скорости ветра, как в пределах областей, так и для территории Беларуси, в целом. 2. По всей территории Беларуси имеют место отрицательные тренды, это показывает временную динамику снижения скоростей ветра по всей республике. Скорости ветра уменьшаются в среднем за 10 лет от 0,08 м/с в Бресте до 0,37 м/с в Витебске, однако в Горках скорости ветра возрастают. В качестве причин следует отметить общепланетарные процессы и увеличение шероховатости поверхности вблизи метеоплощадок (застройка, зарастание древесно-кустарниковой растительностью). 3. Анализ результатов расчетов показывает, что на высоте 60-80 м средняя скорость ветра возрастает до 1,5-2,0 раз в зависимости от класса шероховатости. ВЭУ большой мощности с такой высотой мачты будут наиболее эффективны и производительней, чем ВЭУ малой мощности, расположенной на высоте флюгера (10 м). 4. Анализ полученных карт показал следующие особенности пространственного распределения скоростей ветра по территории Беларуси. Среднегодовая скорость увеличивается с юго-востока к центру Беларуси (от 2,1 м/с до 2,7 м/с) и от центра идет на спад в северо-восточном направлении (от 2,7 м/с до 2,4 м/с), а с запада и востока страны идет уменьшение скоростей ветра к центру страны (от 3,7 м/с до 2,2 м/с). 5. Территорию Беларуси условно можно разделить на две ветровые зоны, границы которых должны уточняться в ходе ветроэнергетических расчетов и анализа карты физико-географического районирования. 6. Таким образом, с учетом проведенных исследований Республика Беларусь обладает достаточным ветроэнергетическим потенциалом для экономически обоснованного внедрения ВЭУ и ветропарков.

Список цитированных источников

1. Харитонов, В. П. Основы ветроэнергетики / В. П. Харитонов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 340 с.
2. Курочкина, А. И. Развитие ветроэнергетики в Беларуси / А. И. Курочкина // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 2. – С. 109–115.
3. Мешик, О. П. Правовое регулирование получения солнечной энергии и опыт реализации гелиоэнергетических проектов в Республике Беларусь / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Экологическая безопасность 1991 – 2021 : сборник материалов заочной научно-практической конференции, посвященной юбилейной дате образования РУП «Бел НИЦ «Экология» / РУП «Бел НИЦ «Экология»; [сост.: В. М. Конькова]. – Минск, РУП «Бел НИЦ «Экология», 2021. – С. 111–114.
4. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежегодник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1981-2020 гг.
5. Порядок оценки ветроэнергетического потенциала при размещении ветроэнергетических установок на территории Республики Беларусь = Парадак ацэнкі ветраэнергетычнага патэнцыяла пры размяшчэнні ветраэнергетычных устаноў на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь : ТКП 17.10-39-2012 (02120). – Введ. 01.07.2012. – Минск : Республиканский гидрометеорологический центр, 2012. – 15 с.
6. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1972. – 112 с.