

ИЗУЧЕННОСТЬ ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Горбунова Татьяна Юрьевна, младший научный сотрудник, Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, 298188, Российская Федерация, Республика Крым, пгт. Курортное, г. Феодосия, ул. Науки, 24, e-mail: gorbunovatyu@gmail.com

Работа посвящена анализу методик и результатов оценки потенциала ветровой энергетики на территории Крымского полуострова. В ходе работы рассмотрено большое количество литературных источников, в том числе атласы, монографии, специализированные и обзорные статьи. Анализ проведенных количественных оценок и картографического материала представлен в виде сравнительной таблицы и показывает достаточно широкий разброс определяемых величин и полученных результатов. Такой результат обоснован наличием различных методик и исходных материалов, а также уровнем расчетов и моделирования. Для внедрения ветроэнергетических установок необходимы более детальные исследования на определенных модельных участках, где в силу вступают другие пространственных факторы, например, характер подстилающей поверхности, барьерный эффект.

Ключевые слова: ветер, анализ и методика оценки, валовый потенциал, ветроэлектростанция, ветровая энергия, ветроэнергетический потенциал, Крымский полуостров, мощность ветрового потока, скорость ветра, технический потенциал

STUDY OF WIND ENERGY POTENTIAL OF THE CRIMEAN PENINSULA

Gorbunova Tatyana Yu., Junior Researcher, T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS, 24 Nauka st., Feodosia, Kurortnoe, Crimea Republic, 298188, Russian Federation, e-mail: gorbunovatyu@gmail.com

The paper is devoted to the analysis of methods and results of the assessment of the wind power potential on the territory of the Crimean peninsula. In the course of the work, a large number of literature sources were considered, including atlases, monographs, specialized and review articles. The analysis of the quantitative estimates and cartographic material is presented in the form of a comparative table and shows a rather wide range of the determined values and obtained results. Such a result is justified by the availability of various techniques and source materials, as well as the level of calculations and modeling. More detailed studies are needed for the introduction of wind power plants at certain model sites, where other spatial factors, for example, the nature of the underlying surface, the barrier effect, enter into force.

Keywords: wind, analysis and evaluation technique, gross potential, wind energy, wind power station, wind energy potential, the Crimean peninsula, power of wind flow, wind speed, technical potential

Территория Крымского полуострова обладает значительными ресурсами возобновляемых источников энергии, которые на сегодняшний день в силу различных причин не используется. В настоящее время в связи со сложившейся геополитической ситуацией вопросы энергетической безопасности

становятся в Крыму весьма значимыми. В этой ситуации создание дополнительной энергогенерации, в том числе, ветровой, как никогда актуально. Для понимания потенциала территории важным аспектом является анализ его изученности, тем более что территория полуострова была пионерной в изучении ветропотенциала территории бывшего СССР.

Целью данной работы является ретроспективный анализ методик и результатов оценок потенциала ветровой энергетики для территории Крымского полуострова.

Исследования ветропотенциала: методы и результаты оценки. Активное изучение ветрового энергетического потенциала (ВЭП) Крымского полуострова началось проводиться с 20-х гг. XX столетия. В 1923 г. сотрудниками Центрального аэрогидродинамического института Н.В. Красовским, Г.Х. Сабининым было подсчитано общее количество ветряных двигателей на территориях губерний европейской России, их плотность, вероятная средняя установленная мощность [23]. И хотя количественных данных отдельно по Таврической губернии в работе [23] приведено не было, в картографическом виде представлена средняя плотность двигателей по губерниям европейской части России, в том числе и Таврической (до 25 ветродвигателей на 1000 кв. верст). На карту были нанесены также изолинии скоростей ветра для зимнего периода.

Оценка общей мощности ветродвигателей, расположенных на рассматриваемой территории, проводилась авторами на основе известных скоростей ветра и из предположения, что диаметр ветроколеса отдельной установки составлял 16 м, а коэффициент использования энергии ветра – 0,2.

Оценка технического потенциала территорий была проведена с учетом влияния рельефа, растительности и застройки на скорость и величину энергии ветра. Предполагалось, что скорость ветра восстанавливается через 10–15 величин высоты преграды. «Разместив» ветряные двигатели в шахматном порядке на расстоянии, равном их десятикратной высоте, авторы рассчитали количество двигателей, которое можно разместить на 1 км² и среднюю годовую мощность, которую можно получить с 1 км² территории.

На основе сравнения стоимости энергии, полученной от ветра, и энергии от традиционных источников, был сделан вывод о дешевизне энергии ветра. Побережье Черного моря выделяется авторами как территория с дешевой энергией ветра, которая может конкурировать с любой традиционной энергией.

Таким образом, Н.В. Красовским, Г.Х. Сабининым были даны опосредованные оценки ветроэнергетического потенциала через максимальную установленную мощность ветродвигателей на территории Таврической губернии, проведены расчеты технического потенциала и себестоимости энергии. Авторы прогнозировали быстрое развитие ветровой энергетики при совершенствовании конструкции ветряных двигателей и создании поселений с автономным энергообеспечением.

Методика, развитая в [23], была в дальнейшем использована Н.В. Красовским в ряде работ [19–22], в которых проводился расчет скоростей и мощности ветра. Так, в [20] автором была построена карта среднегодовых скоростей ветра Европейской части СССР на основании данных 1387 метеостанций за период с 1891 по 1909 г. Данные усреднены по ячейкам и штриховкой показаны преобладающие скорости ветра, которые в Крыму имеют значения свыше 5 м/с. Построены гистограммы сравнительного количества энергии ветра, которое можно получить с 1 км² территории и сравнительной стоимости единицы установленной мощности.

В работе [21] более подробно рассматривается рельеф как фактор, влияющий на перераспределение скорости ветра. Согласно представлениям авторов, близ вершины горной гряды скорость ветра увеличивается не менее чем в 1,2 раза по сравнению с нижними частями склонов. На основе развитых подходов предложен метод и проведены расчеты установленной мощности и среднегодовой выработки, отнесенные к 1 км² земной поверхности при различных средних скоростях ветра. Установленная мощность и годовая выработка ветровых двигателей определялись в зависимости от повторяемости скоростей ветра в конкретных районах, а также от технических характеристик ветровых двигателей и электрогенераторов, в том числе потерь энергии в трансмиссиях ветровых двигателей, и др. Проведены расчеты средней годовой произведенной энергии ветровыми двигателями, установленными с заданной плотностью на территории областей РСФСР. Показано, что для Крымской АССР расчетная мощность ветровых двигателей составляет $20,4 \cdot 10^6$ кВт, а среднегодовое количество энергии ветра достигает $37,8 \cdot 10^9$ кВт·ч.

М.В. Келлером в конце 20-х гг. [16] был произведен расчет мощности воздушной струи единичной площади сечения по данным метеостанций Севастополь и Караби-Яйла. На основе диаграмм повторяемости скорости ветра было проведено сравнение количества энергии, которое обеспечивается средними скоростями (и средней повторяемостью) ветра и большими скоростями, при низкой их повторяемости. Проведено определение оптимальной для заданных установок скорости ветра, а также экономических характеристик действующих ветрогенераторов (количество вырабатываемой за год энергии, годовые финансовые расходы, сопряженные с работой установки, распределение отдаваемой энергии в течение года). Рассмотрены следующие варианты работы ветроэнергетической установки (ВЭУ): самостоятельная работа без аккумуляирования, с аккумуляированием, с тепловым резервом, работа на общую сеть с аккумуляированием, работа на общую сеть с аккумуляированием только излишков энергии, работа ветровых установок на потребителя большой мощности (промышленные предприятия). Таким образом, работа М.В. Келлера дала научно обоснованные подходы к развитию ветроэнергетики в 30-е гг. в Крыму.

Л.П. Федосенко, О.Г. Денисенко, С.В. Маргалик [28] на основе данных 147 метеостанций УССР о скорости ветра, приведенной к высоте 16 м с использованием логарифмического закона, провели оценку удельной мощности ветрового потока. Авторы определили среднее значение мощности ветра вводя усредненные месячные коэффициенты неравномерности $K_m = P_m / P_r$ (P_m – среднемесячная ветровая мощность; P_r – среднегодовая ветровая мощность) в каждый месяц на указанной территории. Анализ полученных результатов показал, что мощность ветра более 138 Вт/м² наблюдаются на территории Керченского полуострова и Горного Крыма в течение всего года. На Тарханкутском полуострове мощность ветра составляет 138 Вт/м² и более зимой, весной и осенью. На остальной территории полуострова значения мощности ветрового потока изменяются от 17 Вт/м² летом до 138 Вт/м² зимой. Рассчитанные значения мощности ветра в различные сезоны года были нанесены на картосхемы.

В работе [4] коллективом авторов была проведена оценка энергетического потенциала возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Анализируя карты распределения ветрового потенциала можем сказать, что среднегодовая скорость ветра 5,5 м/с на высоте 10 м наблюдается на Керченском и Тарханкутском полуостровах, в Горном Крыму, скорость 5 м/с – в Равнинном Крыму;

на остальной территории Крыма среднегодовые скорости ветра не превышают 4 м/с. Значения технического ВЭП изменяются в такой же зависимости: 3,2 МВт·ч/м² год на Керченском и Тарханкутском полуостровах, в Горном Крыму, 2,81 МВт·ч/м² год в равнинном Крыму и 1,12 МВт·ч/м² год на остальной территории полуострова. Значения технического достижимого ВЭП составляют, соответственно, 0,62, 0,52 и 0,2 МВт·ч/м² год.

В работе [27] коллективом авторов из группы экспертов TESIS была проведена оценка ВЭП территории Крымского полуострова и выявление наиболее перспективных участков на основе модели NOABL. Результатом расчетов по модели стала трехмерная картина распределения скоростей ветра. Статистический анализ полученных результатов был проведен с помощью программы WAsP. Результаты расчетов по модели были верифицированы по 5 метеостанциям Крыма. Полученные результаты верификации дали погрешность в диапазоне 8–10 %. При выборе наиболее перспективных участков для строительства ветроэлектростанций в работе учитывались следующие факторы: средняя скорость ветра на высоте 25 м (не менее 5,5 м/с); высота территории над уровнем моря (не выше 1000 м); уклон поверхности (не более 5°); размеры участка (не менее 1 км²). В результате были выделены участки общей площадью 200 км², расположенные по побережью Сивашского залива, на Керченском полуострове, полуострове Меганом, Тарханкут, м. Фиолент. Были составлены т.н. «ветроатласы первого уровня» для высоты 25 м в масштабе 1:200000 и 1:500000. ВЭП выделенных участков оценивался для турбин различной мощности при коэффициенте использования установленной мощности, равном 0,33, номинальной скорости ветра 15 м/с. В результате проведенных расчетов были получены значения производительности ветротурбин. При введении коэффициентов готовности ветротурбин на уровне 98 % (среднеевропейское значение) и 85 % (фактическое местное среднее значение) были получены годовые значения выработки энергии от ветроэлектростанций для Крыма (табл. 1).

Таблица 1

Прогнозные значения выработки энергии для Крыма (по [27])

Удельная мощность, МВт/км ²	Годовая выработка энергии, ГВт·ч/год			
	Коэффициент использования (средняя мощность турбины)		Коэффициент использования (большая мощность турбины)	
	(98 %)	(85 %)	(98 %)	(85 %)
13	2405	2085	3295	2855
8	1480	1286	2035	1765
5	915	795	1260	1095

Таким образом, в [27] были проведены оценки ВЭП территории Крыма, а также рассмотрены экологические аспекты воздействия ветроэлектростанций на окружающую среду и человека (визуальное воздействие, шумовой эффект, электромагнитные помехи, угроза гибели птиц и др.). Однако исследований, опровергающих или подтверждающих негативное влияние этих факторов, в рамках работы проведено не было; не учитывался ряд ограничивающих экологических факторов при выборе пригодных участков для строительства ветроэлектростанций. В частности, в качестве приоритетных для строительства были выделены водно-болотные угодья Присивашья, которые охраняются международной Рамсарской конвенцией.

Г.А. Бабенко в работе [6] приводит описание существующих на тот момент в Крыму систем нетрадиционной энергетики и дает прогноз по их дальнейшему развитию. Также в работе приведены данные по энергетическому потенциалу нетрадиционных источников Крыма. В частности, теоретический ВЭП составляет 96 млрд МВт·ч/год. Однако автором не указаны методики, по которым был произведен расчет данных величин.

Работа З.У. Рамазановой [24] посвящена методам прогнозирования ветрового энергетического потенциала региона. Проведенный в работе анализ существующих на тот момент исследований выявил недостаточность существующего инструментария для оценки ветрового энергетического потенциала региона. Результатом диссертационного исследования стал комплекс моделей и методов для долгосрочного прогнозирования ВЭП Крымского полуострова. Средняя ошибка моделирования ВЭП на основе полученных карт, составляет 5,6 %. В работе выделены территория с высоким ВЭП. К ним относят Тарханкутский полуостров, а также западное побережье Черного моря до г. Евпатория, север Керченского полуострова. Автор утверждает, что на 10 % территории с высоким потенциалом можно рационально разместить генерирующие мощности, сопоставимые с потреблением электроэнергии Крымом. Однако в работе не указаны критерии, по которым возможно произвести данное рациональное размещение генерирующих мощностей.

Анализ распределения скоростей и энергии ветра по территории Крымского полуострова на основе данных Климатического атласа Крыма [18] был проведен в [26]. Принималось, что в перспективных для использования ветра регионах среднегодовая скорость ветра должна быть более 4–6 м/с. В результате в качестве наиболее богатых ветроэнергетическим потенциалом были определены горные и приморские территории Крымского полуострова. Справедливо указывалось, что для территории Крыма особое внимание при анализе ВЭП должно уделяться характеру рельефа (открытость или закрытость, форма склонов и т.д.), типу растительности, местной циркуляции (горно-долинные ветра, бризы, фены, бора). В работе проведено сравнение значений скорости ветра из нескольких источников данных (Справочник по климату СССР, данные метеорологической станции г. Симферополь, сайты gismeteo.ua, meteo.infospace.ru) за различные временные промежутки. Отмечено, что ход временной зависимости в основном совпадает, однако амплитудные значения разнятся. На основе подходов классической аэродинамики, средних значений скорости ветра и данных о количестве дней в году, когда ветровые условия принципиально обеспечивают работу ВЭУ ($V_{\min} = 4 \text{ м/с} < V < V_{\max} = 25 \text{ м/с}$) были определены значения удельной мощности ветрового потока на территории Крыма.

Наибольшей мощностью ветрового потока обладает юг Керченского полуострова (от 210 Вт/м² и более 313 Вт/м²). Также значительные показатели мощности наблюдаются на крайнем северо-северо-западе полуострова Крым и участке Горного Крыма близ г. Судак и г. Ялта (132–210 Вт/м²). Таким образом, в работе представлены результаты оценки теоретической мощности ветрового потока без учета ландшафтных и экологических факторов.

Работа С.А. Величко [8] посвящена описанию возобновляемых источников энергии на территории Украины, произведен анализ скоростей ветра по сезонам года. На территории Крымского полуострова в течении всего года наибольшие скорости ветра наблюдаются на Тарханкутском и Керченском полуостровах и составляют зимой 5–7 м/с, весной – 5–6 м/с, летом – 4–5 м/с и осенью – 4–7 м/с.

В.М. Головки и Г.П. Душина в [9] использовали аналогичные подходы к оценке ветроэнергетического потенциала, определив производительность реальной ВЭУ при известной повторяемости ветра как

$$E = \sum_{i=1}^n N_i t_i, \quad (1)$$

где N_i – мощность ВЭУ при i -ой градации скорости ветра; t_i – продолжительность скорости ветра в i -ой градации; n – число градаций скорости ветра. При этом предполагалось также, что:

1. Оценку энергии ветра следует проводить в диапазоне скоростей ветра от 4 м/с (начало работы ВЭУ) до 15 м/с (остановка работы ВЭУ).

2. ВЭУ теоретически не могут реализовывать более 0,58–0,62 объема энергетического потенциала.

3. Номинальная скорость ветра составляет 1,25 от средней скорости ветра за целесообразный период использования ВЭУ (под целесообразным периодом авторы понимают промежуток времени, когда скорость ветра больше 4 м/с, но меньше 15 м/с).

На основе этих подходов в работе представлено распределение по территории Крыма целесообразного периода использования энергии ветра, продолжительность которого составила от 31 дня до года. Наиболее перспективными по этому критерию являются северные районы (Черноморское – Ишунь-Джанкой), горные массивы и Керченский полуостров. Малопригодными районами – центральная часть полуострова (Почтовое – Симферополь – Белогорск) и Южный берег (Ялта – Алушта). Удельный технический потенциал энергии ветра был определен в диапазоне 350–1170 кВт·ч на м² площади, ометаемой ветроколесом. Территориальная зависимость интенсивности потенциала совпадает с распределением периодов целесообразного использования энергии ветра: наибольшим удельным техническим потенциалом обладает территория Керченского полуострова, а также г. Феодосия с окрестностями.

Л.В. Дмитренко и С.Л. Барандич [10] провели анализ распределения ветроэнергетических характеристик по сезонам года. Зимой наблюдаются наибольшие средние скорости ветра, значения которых увеличиваются к югу (до 7–8 м/с). Соответственно, удельная мощность ветрового потока также увеличивается к югу и на побережье Черного моря достигает 471–597 Вт/м². Аналогичное распределение имеет и количество потенциальной выработанной ветром энергии. Этот показатель достигает 0,97–1,11 МВт·ч/м² ометаемой площади в зимний сезон.

В работах [10;11] рассчитана удельная мощность ветрового потока и проведено районирование территории Украины по потенциалу ветровой энергии (табл. 2). При этом в [11] предложен алгоритм выбора местоположения объектов ветроэнергетики с точки зрения метеорологических показателей, в [10] проведен анализ распределения ветроэнергетических характеристик по сезонам года. Так, зимой наблюдаются наибольшие средние скорости ветра, значения которых увеличиваются к югу (до 7–8 м/с). Соответственно, удельная мощность ветрового потока также увеличивается к югу и на побережье Черного моря достигает 471–597 Вт/м². Согласно проведенному районированию побережье Черного и Азовского морей, Южный берег Крыма, вершины Крымских гор обладают наибольшим ВЭП, практически постоянными ветровыми условиями в течение всего года. Однако данные исследова-

ния проведены на макроуровне для сравнительно большой территории и требуют дополнительных расчетов для выбора конкретных участков для строительства объектов ветроэнергетики.

Таблица 2

Районирование территории по ВЭП (составлено по данным [10])

Регион				Побережье Черного и Азовского морей, Южный берег Крыма, вершины Карпат и Крымских гор	
Показатели районирования	Среднегодовая скорость ветра			5,5–6,5	
	Удельная мощность ветровой энергии, Вт/м ² ометаемой площади		потенциальная	250–300	
			доступная для использования	200–250	
	Суммарная мощность ветровой энергии, Вт/м ²		потенциальная	8000–9500	
			доступная для использования	7000–8000	
	Продолжительность (часов) различных градаций скорости ветра, м/с	общая	<3	1250–6500	
			>3	5500–6500	
			>5	3000–5500	
		непрерывная >3		20–35	
Оценка потенциала ветровой энергии				Очень высокий потенциал, наиболее благоприятные условия для использования ветра	

В работах В.В. Ефимова с соавторами [13; 14] проведена оценка ВЭП на основе численных расчетов полей ветра с помощью региональной модели атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением (модель HadRM3H [29]). В качестве исходных данных для численного моделирования был использован реанализ ERA40. HadRM3H позволяет провести моделирование динамических процессов в атмосфере и приповерхностном слое в заданном регионе и определить значения скорости ветра на уровне 50 м, температуру поверхности земли, потоки тепла и влаги с дискретностью 1 час. Разрешение модели составляет 25×25 км, что может являться основой для последующих локальных оценок ВЭП.

Для сравнения расчетных данных реанализа с наземными измерениями скорости ветра авторами были использованы метеостанции Крымского региона: Геническ, Керчь, Новая Каховка, Симферополь, Херсон и Черноморское. Были получены высокие значения корреляции расчетных и экспериментальных массивов данных как для температуры (0,9÷0,98), так и скорости ветра (0,69÷0,8). Среднеквадратичное отклонение измеренных и рассчитанных значений скоростей ветра по всем 6 станциям составило 0,33 м/с.

Полученное в [13;14] распределение среднееголетнего значения ВЭП (удельной мощности ветра) на высоте 50 м, усредненного за климатический период с 1957 по 1997 гг. показало, что максимальное среднегодовое значение ВЭП получено для Керченского и Тарханкутского полуострова и составляет 700–800 Вт/м². Результаты сравнения рассчитанных и измеренных «эффективных» величин ВЭП на территории Крыма приведены в таблице 3. Под «эффективным» ветропотенциалом авторы понимают ВЭП, рассчитанный для скоростей ветра более 5 м/с.

Таблица 3

Значение «эффективных» величин ВЭП, осредненных
 за период 1958–1997 гг. [13]

Станция	Количество дней за 40 лет с $u \geq 5$, м/с	Средний ВЭП за весь период, Вт/м ²	
		станция	модель
Керчь	3046	109,98	189,14
Симферополь	2054	96,08	62,97
Черноморское	3048	136,27	169,70

На основе полученных расчетных массивов была сформирована база данных по полям ветра, которая позволяет при необходимости вычислить все статистические характеристики скорости ветра и энергопотенциала, такие как средние величины и моменты распределения для любых выбранных месяцев и сезонов года, каждого года за весь 40-летний период, величины доступного ВЭП с учетом порогов трогания и заданной высоты расположения ВЭУ. Локальные особенности поля ветра, связанные в первую очередь с мелкомасштабными особенностями рельефа и шероховатости поверхности, не учтены и требуют дополнительного уточнения. Однако по детальности и уровню проведенных исследований полученные оценки являются на наш взгляд наиболее адекватными поставленной задаче.

В работе А.Р. Абдуллаева [2] рассмотрены инновационные пути развития Крыма, а именно развитие возобновляемых источников энергии. Автор в своей статье указывает, что ветроэнергетика занимает лидирующее положение в структуре возобновляемых источников энергии на полуострове. По его мнению, технически достижимый энергетический потенциал ветроэнергетики Крыма составляет 5 тыс. МВт.

В работе [3] А.Р. Абдуллаев, кроме того, выделяет территории, перспективные для использования в ветроэнергетике – 2300 км² – это участки, на которых коэффициент использования номинальной мощности ветровой электростанции превышает 0,3 (северная часть Керченского полуострова и Тарханкутский полуостров). Кроме этого, перспективным участком Абдуллаев считает южное побережье залива Сиваш. Повышенным ВЭП также обладают территории в районе городов Симферополь и Севастополь. Согласно работе [1] коэффициент использования нормативной мощности на выделенных территориях достигает значений свыше 25 %.

А.И. Башта в работе [7], посвященной инновационному развитию рекреационных территорий на основе энергосбережения, ссылаясь на данные «Крымэнерго», дает примерную оценку суммарному ВЭП Крымского полуострова – 10–15 млн. МВт·ч/год. Годовой технический потенциал ветровой энергии Крыма рассчитала также Н.Ш. Ресульева в работе [25]. Он составляет 6,95 млн МВт·ч/год. К сожалению, в работах [1–3;7;25] не указаны исходные данные и методы, по которым были рассчитаны значения ВЭП.

Работа Т.И. Егорченко [12] посвящена оценке природно-ресурсного потенциала Крыма. Рассмотрены запасы ископаемого традиционного топлива, а также возможность использования альтернативных возобновляемых источников энергии. Автор утверждает, что для оценки ВЭП территории необходимы данные по средним скоростям ветра (для работы ветроустановок средняя скорость ветра должна быть более 2 м/с) и стабильности ветрообразующих факторов. На основе этих данных, а также результатов исследований ВЭП АР Крым, выполненных Межотраслевым научно-техническим центром ветроэнергетики НАНУ в 2004 г., Т.И. Егорченко сделала вывод о целесообразности использования ветровых установок на территории площадью 2300 м².

О.И. Ильина с соавторами [15] произвела расчет возможной мощности ветроэлектростанций, которые можно разместить на перспективных участках Большой Феодосии. Перспективные участки выбирались по следующим критериям: среднегодовая скорость ветра на высоте 100 м, крутизна поверхности не более 5° , степные неиспользуемые участки, площадь участка не менее 1 км^2 , расстояние до населенного пункта не менее 300 м. В результате была получена карта приоритетных участков для строительства ветровых электростанций и рассчитан технический потенциал ветроустановок на выделенных участках площадью $30,99 \text{ км}^2$, что в сумме за год составило 303,8 тыс. МВт·ч.

Работа [5] посвящена картографированию ресурсов возобновляемой энергии на территории России. На основе базы данных NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) [30] авторами рассчитаны значения и построены карты среднегодовой скорости ветра, плотности энергии ветрового потока, годовых удельного валового и технического потенциала энергии ветра, общей продолжительности ветрового затишья в течение года, годовых валового и технического потенциалов энергии ветра территории субъектов РФ. На основе данных метеостанций проведена верификация метеорологических величин (скорости ветра) NASA SSE. Характеристики ветроэнергетического потенциала рассчитаны для ячеек размером $1^\circ \times 1^\circ$ для всей территории России. Результаты определения характеристик ВЭП из [30] агрегированы в таблице 4.

Таблица 4

**Среднегодовые значения характеристик ВЭП
для территории Крымского полуострова, высота 50 м**

Характеристика ВЭП		Значение
Скорость ветра, м/с		5,2–6,2
Плотность энергии ветрового потока, Вт/м ²		244–374
Годовой удельный валовый потенциал энергии ветра, МВт·ч/год		2490–3820
Годовой удельный технический потенциал энергии ветра, МВт·ч/год		1750–2360
Общая продолжительность энергетического затишья в течение года, %		9–26
Годовой валовый потенциал энергии ветра субъекта, млн МВт·ч/год		200–400
Годовой технический потенциал энергии ветра субъекта, млн МВт·ч/год		30–60

При расчете технического ветроэнергетического потенциала территории авторы учли только земли сельскохозяйственного назначения и земли запаса, при более детальных расчетах на региональном и локальном уровне требуется анализ структуры земельного фонда исследуемых территорий.

Работа [17] посвящена разработке алгоритма выбора территорий, пригодных для строительства ветроэлектростанций с учетом физико-географических ограничений, экологических норм, эстетической ценности ландшафтов и особенностей современного природопользования. Разработанный алгоритм был апробирован на территории Юго-Восточного Крыма. В результате был построена карта перспективных участков для строительства ветроэлектростанций и рассчитан валовый потенциал выделенных участков.

Сравнительный анализ оценок ветроэнергетического потенциала. На основе анализа публикаций, посвященных исследованию ветроэнергетического потенциала Крымского полуострова с 1920-х гг. до настоящего времени, авторами составлена таблица, обобщающая результаты оценок, представленных в этих работах (табл. 5).

Таблица 5
Сравнительный анализ расчетов ветроэнергетического потенциала Крыма различными авторами

Источник	Источник данных	Показатели и единицы измерения				Наиболее перспективные районы
		УМВП	млн кВт	ВВП	УП	ТНТ
Красовский, Сабитов, 1923 [23]	Метеостанции, данные	-	-	-	-	-
Красовский, 1936 [20]	Метеостанции	-	20,4 тыс. МВт/год	37,8 млн МВт/год	-	-
Федосенко и др., 1989, [28]	Метеостанции	1728-138 Вт/м ²	-	-	-	-
Атлас..., 2001 [4]	-	1,12-3,2 МВт/м ²	-	-	0,2-0,6 МВт/м ²	-
Устойчивый Крым..., 2002, [27]	Метеостанции, модель БЮАВ, программа VГ АЭР	-	-	0,915-2,855 млн МВт/год	-	-
Бабенко, 2002 [6]	-	-	-	96 млрд МВт/год	-	-
Солнечная энергетика..., 2002, [26]	Метеостанции	16,54-313,6 Вт/м ²	-	-	-	-

Продолжение таблицы 5

Источник	Источник данных	Показатели и значения ветропотенциала				Наименование карты	Наиболее перспективные районы
		УМВП	МВП	ВВП	УП	лпг	
Головкин и др., 2005, [9]	Метеостанции	-	-	-	0,35-1,17 МВт·ч/м²	-	Северная часть Крымского полуострова, Керченский полуостров, Горный Крым.
Дмитренко, Баранчик, 2007, [10]	Метеостанции	250-300 Вт/м²	-	-	0,97-1,11 МВт·ч/м²	-	Побережье Черного и Азовского морей, Южный берег Крыма, вершины Крымских гор
Ефимов и др. 2009, 2010, [13, 14]	Метеостанция, модель НИСИПН, данные разведки ЕКА40	700-800 Вт/м² (для высоты 50 м)	-	-	-	-	Керченский полуостров, Парангутский полуостров.
Башта, 2011 [7]	«Крымэнерго»	-	-	10-15 млн МВт·ч/год	-	-	-
Рысулбаев, 2011 [25]	-	-	-	6,95 млн МВт·ч/год	-	-	-
Атлас..., 2015, [5]	Метеостанция БД НАСА 33E	200-370 Вт/м² (для высоты 50 м)	-	200-400 млн МВт/год (для высоты 50 м)	-	30-60 млн МВт/год	Западная часть Крымского полуострова

Примечание: УМВП – удельная мощность ветрового потока; МВП – мощность ветрового потока на территории; ВП – валовый потенциал территории; УТП – удельный технический потенциал; ТП – технический потенциал территории.

В большинстве рассмотренных исследований оценки основаны только на данных метеостанции о скоростях и повторяемости ветра [9, 10, 18, 20, 23, 28]. И лишь в [5, 13, 14, 27] использованы различные модели для расчета и пространственного анализа ветроэнергетического потенциала. Метеоданные в этих работах являются основой для верификаций применяемых моделей.

В качестве характеристик ВЭП в большинстве случаев рассматривались удельная мощность ветрового потока [4, 10, 13, 14, 28] или мощность всех ВЭУ, которые возможно разместить на территории [20]. В [5–7, 20, 25, 27] приводятся значения валового ветропотенциала всей территории, причем эти значения существенно различаются между собой.

Технический потенциал был рассчитан в [9] как удельный технического потенциал (в расчете на единичную ометаемую площадь), а также в [5], где приведено значение годового технического потенциала всего Крымского полуострова, равного общей годовой производительности ВЭУ известного типа, занимающих всю территорию. В некоторых из рассмотренных работ полученные результаты были отображены в виде карт.

Выводы.–Анализ проведенных количественных оценок и карт показывает достаточно широкий разброс определяемых величин и полученных результатов. Наибольшее количество оценок относится к удельной мощности ветрового потока и валовому потенциалу энергии ветра для территории Крыма. Сопоставление результатов затруднено тем, что в рассмотренных работах зачастую не приведены методики определения ветропотенциала, и сами оценки относятся к различным высотам (10–12 м [4, 6, 7, 9, 10, 20, 23, 25–28], 50 м и выше [5, 13, 14]). Результаты определения удельной мощности ветрового потока на высоте метеонаблюдений [10, 26, 28] и удельного технического потенциала [4, 9, 10] согласуются между собой по верхнему пределу оценок (по крайней мере, по порядку величины). Эти результаты можно сопоставить с величинами валового потенциала территории и удельной мощности ветровых потоков из [5, 13, 14], только приняв некоторые допущения относительно роста скорости ветра с высотой. Если предположить, что скорость ветра увеличивается в 2 раза при переходе от высоты 10 м к 50 м, то вполне согласуются данные [20] и [5], что говорит об адекватности полученных в обеих работах результатов. Также сравнимы значения валового потенциала территории, полученного в работах [7, 25, 27], а значения в работе [6] намного их превышают и представляются сомнительными. В тоже время оценки [13, 14] и [5], полученные на основе данных реанализа на регулярной сетке и моделирования для одинаковой высоты (50 м), отличаются, по крайней мере, в 3 раза. Для оценки достоверности полученных результатов необходимо, по-видимому, использовать данные ветромониторинга на соответствующих высотах.

Таким образом, в работах предложены методики оценок ветропотенциала территории, которые апробированы для территории Крыма. Многими авторами не были рассмотрены особенности территории, которые могут выступать ограничительными факторами для развития ветроэнергетики и снижать технический потенциал территории. Среди таких факторов можно назвать крутизну склонов, экологические факторы (наличие особо охраняемых территорий), наличие и близость населенных пунктов, археологическая, рекреационная, эстетическая ценность и др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-01015 А.

Список литературы

1. Абдуллаев А. Р. Вітроенергетичний потенціал Криму та перспективи його розвитку / А. Р. Абдуллаев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Экономические науки. – 2011. – Вып. 28. – С. 9–12.
2. Абдуллаев А. Р. Использование возобновляемых источников энергии в Автономной Республике Крым / А. Р. Абдуллаев // Экология и промышленность. – 2011. – № 3. – С. 11–15.
3. Абдуллаев А. Р. Перспективы развития нетрадиционных источников энергии в Автономной Республике Крым / А. Р. Абдуллаев // Экология и промышленность. – 2012. – № 3. – С. 18–21.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – Киев : Віол Принт, 2008. – 41 с.
5. Атлас ресурсов возобновляемой энергетики на территории России. – Москва : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 160 с.
6. Бабенко Г. А. Экономичность использования нетрадиционной энергетики в Автономной Республике Крым / Г. А. Бабенко // Экономика Крыма. – 2002. – № 5. – С. 44–50.
7. Башта А. И. Инновационное развитие рекреационных территорий на базе энергосбережения / А. И. Башта // Проблемы економіки. – 2011. – № 3. – С. 55–58.
8. Величко С. А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами та графіками) / С. А. Величко ; під. ред. проф. І. Г. Черваньова. – Харків : Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2003. – 52 с.
9. Головкин В. М. Визначення енергетичних характеристик режиму вітру для автономних систем / В. М. Головкин, Г. П. Душина // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 2. – С. 45–52.
10. Дмитренко Л. В. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л. В. Дмитренко, С. Л. Барандіч // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 166–173.
11. Дмитренко Л. В. Геліо- та вітроенергетичні ресурси / Л. В. Дмитренко // Клімат України. – Киев : Раєвський, 2003. – С. 267–279.
12. Егорченко Т. И. Ресурсное обеспечение энергетической безопасности Крыма / Т. И. Егорченко // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет». Економічні науки. – 2012. – Вип. 147. – С. 209–215.
13. Ефимов В. В. Численное моделирование ветрового энергopotенциала Украины / В. В. Ефимов, В. С. Барабанов, М. В. Шокуров, Р. С. Робустова, Д. А. Яровая // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 1. – С. 44–50.
14. Ефимов В. В. Атлас ветропотенциала Крымского региона / В. В. Ефимов, Р. С. Робустова, М. В. Шокуров, В. С. Барабанов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 46 с.
15. Ильина О. И. Перспективы использования систем возобновляемой энергетики на территории Большой Феодосии / О. И. Ильина, Т. Ю. Горбунова, Р. В. Горбунов // Бранта : сборник научных трудов Азово-Черноморской орнитологической станции. – 2014. – Вип. 17. Специальный выпуск. – С. 143–152.
16. Келлер М. В. Энергетические ресурсы ветра и его использование / М. В. Келлер // Плановое хозяйство. – 1929. – № 8. – С. 243–256.
17. Киселева С. В. Исследование ресурсных возможностей развития ветроэнергетики с учетом физико-географических ограничений и особенностей природопользования (на примере Юго-Восточного Крыма) / С. В. Киселева, Т. Ю. Горбунова // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – 01–02 (189–190). – С. 12–24. doi: 10.15518/isjaee.2016.01-02.001
18. Климатический атлас Крыма / под ред. И. П. Веда. – Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. – 120 с.
19. Красовский Н. В. Использование энергии ветра в народном хозяйстве СССР / Н. В. Красовский. – Ленинград : Полиграфкнига, 1934. – 20 с.
20. Красовский Н. В. Использование энергии ветра для целей электрификации / Н. В. Красовский // Доклады IX Всесоюзного электротехнического съезда. – 1936. – С. 1–36.
21. Красовский Н. В. Как использовать энергию ветра / Н. В. Красовский. – Москва – Ленинград : Главная редакция энергетической литературы, 1936. – 170 с.
22. Красовский Н. В. О перспективах использования энергии ветра / Н. В. Красовский. – Симферополь : Крымполиграфтреста, 1932. – 16 с.
23. Красовский Н. В. Проблема использования энергии ветра / Н. В. Красовский, Г. Х. Сабинин // Труды Центрального аэро-гидродинамического института. – 1923. – Вип. 2. – С. 1–21.
24. Рамазанова З. У. Методи прогнозування вітрового енергетичного потенціалу регіону : автореф. дис. канд. техн. наук / З. У. Рамазанова. – Киев, 2007. – 14 с.

25. Ресульева Н. Ш. Возобновляемая энергетика как приоритетное направление инновационного развития АР Крым / Н. Ш. Ресульева // Культура народов Причерноморья. – 2011. – № 197, Т. 2. – С. 52–54.
26. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / под ред. Н. В. Багрова. – Симферополь : ДОЛЯ, 2009. – 294 с.
27. Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века / под ред. д.г.н., проф. В. А. Бокова. – Симферополь : Экология и мир, 2001. – 400 с.
28. Федосенко Л. П. Математическое моделирование и методы оценки ресурсов ветровой энергетике в УССР / Л. П. Федосенко, О. Г. Денисенко, С. В. Маргалик. – Киев : ИЭД, 1989. – 31 с.
29. Jones R. G. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS / R. G. Jones, M. Noguer, D. S. Hassel, D. Hudgon, S. S. Wilson, G. J. Jenkins, J. F. Witchell. – Exeter, UK : Met. Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
30. NASA Surface meteorology and Solar Energy. – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 22.03.2016)

References

1. Abdullaev A. R. Vetroenergeticheskiy potentsial Krima i perspektivy yego rozvitiya [Wind energy potential of Crimea and prospects for its development]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki* [Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. Economic Sciences], 2011, issue 28, pp. 9–12.
2. Abdullaev A. R. Ispolzovanie vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Avtonomnoy Respublike Krym [Use of renewable energy in the Autonomous Republic of Crimea]. *Ekologiya i promyshlennost* [Ecology and Industry], 2011, no. 3, pp. 11–15.
3. Abdullaev A. R. Perspektivy razvitiya netraditsionnykh istochnikov energii v Avtonomnoy Respublike Krym [Prospects for development of non-traditional energy sources in the Autonomous Republic of Crimea]. *Ekologiya i promyshlennost* [Ecology and Industry], 2012, no. 3, pp. 18–21.
4. *Atlas energeticheskogo potentsiala vozobnovlyaemykh istochnikov energii Ukrainy* [Atlas of the energy potential of renewable energy sources in Ukraine], Kiev, Viol Print Publ., 2008. 41 p.
5. *Atlas resursov vozobnovlyaemoy energetiki na territorii Rossii* [Atlas of Renewable Energy Resources in Russia], Moscow, RHTU im. D.I. Mendeleeva Publ. House, 2015. 160 p.
6. Babenko G. A. Ekonomichnost ispolzovaniya netraditsionnoy energetiki v avtonomnoy Respublike Krym [Economical use of non-traditional energy in the autonomous republic of Crimea]. *Ekonomika Kryma* [Economy of Crimea], 2002, no. 5, pp. 44–50.
7. Bashta A. I. Innovatsionnoe razvitie rekreatsionnykh territoriy na baze energosberezheniya [Innovative development of recreational areas based on energy conservation]. *Problemy ekonomiki* [Problems of Economics], 2011, no. 3, pp. 55–58.
8. Velichko S. A. *Energetika okruzhayushchey sredy Ukrainy (s elektronnyimi kartami i grafikami)* [Energy of the environment of Ukraine (with electronic maps and graphs)], Kharkiv, Kharkiv National University named after V.N. Karazin Publ. House, 2003. 52 p.
9. Golovko V. M., Dushina G. P. Opredelenie energeticheskikh kharakteristik rezhima vetra dlya avtonomnykh sistem [Determination of the power characteristics of the wind mode for autonomous systems]. *Vozobnovlyaemaya energetika* [Renewable Energy], 2005, no. 2, pp. 45–52.
10. Dmitrenko L. V., Barandich S. L. Vyetroenyrgyetycheskiye resursy v Ukraine [Wind power resources in Ukraine]. *Nauchnye raboty UkrNIGMI* [Proceedings of the UkrNDGMI], 2007, issue 256, pp. 166–173.
11. Dmitrenko L. V. Gelio- i vetroenergeticheskiye resursy [Helium and wind energy resources]. *Klimat Ukrainy* [The climate of Ukraine], Kiev, Raevskiy Publ., 2003, pp. 267–279.
12. Yegorchenko T. I. Resursnoe obespechenie energeticheskoy bezopasnosti Kryma [Resource support for the energy security of the Crimea]. *Nauchnye raboty Yuzhnogo filiala Natsionalnogo uniiversietu bioresursov i prirodopolzovaniya Ukrainy «Krymskiy agrotekhnologicheskiiy universitet»*. *Ekonomicheskie nauki* [Proceedings of the Southern Branch of the National University of Bioresources and Natural Resources of Ukraine “Crimean Agrotechnological University”. Economic Sciences], 2012, issue 147, pp. 209–215.
13. Yefimov V. V., Barabanov V. S., Shokurov M. V., Robustova R. S., Yarovaya D. A. Chislennoe modelirovanie vetrovogo energopotentsiala Ukrainy [Numerical modeling of wind energy potential in Ukraine]. *Vozobnovlyaemaya energetika* [Renewable Energy], 2010, no. 1, pp. 44–50.
14. Yefimov V. V., Robustova R. S., Shokurov M. V., Barabanov V. S. *Atlas vetropotentsiala Krymskogo regiona* [Atlas of the wind potential of the Crimean region], Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2009. 46 p.

15. Ilina O. I., Gorbunova T. Yu., Gorbunov R. V. Perspektivy ispolzovaniya sistem vozobnovlyаемой energetiki na territorii Bolshoy Feodosii [Prospects for using renewable energy systems in the territory of the Big Feodosiya]. *Branta: Sbornik nauchnykh trudov Azovo-Chernomorskoy ornitologicheskoy stantsii* [Branta. Proceedings of the Azov-Black Sea Ornithological Station], 2014, issue 17. Special issue, pp. 143–152.
16. Keller M. V. Energeticheskie resursy vetra i ego ispolzovanie [Wind power resources and its use]. *Planovoe khozyaystvo* [Planned Economy], 1929, no. 8, pp. 243–256.
17. Kiseleva S. V., Gorbunova T. Yu. Issledovanie resursnykh vozmozhnostey razvitiya vetroenergetiki s uchetom fiziko-geograficheskikh ogranicheniy i osobennostey prirodoispolzovaniya (na primere Yugo-Vostochnogo Kryma) [Investigation of resource opportunities for the development of wind energy, taking into account physical and geographic constraints and features of nature management (on the example of the South-Eastern Crimea)]. *Alternativnaya yenergetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology], 2016, 01–02 (189–190), pp. 12–24. doi: 10.15518/isjaee.2016.01-02.001
18. Vedyia I. P. (ed.) *Klimaticheskyy atlas Kryma* [Climatic Atlas of the Crimea], Simferopol, Tavriya-Plyus Publ., 2000. 120 p.
19. Krasovskiy N. V. *Ispolzovanie energii vetra v narodnom hozyaystve SSSR* [The use of wind energy in the national economy of the USSR], Leningrad, Poligrafkniga Publ., 1934. 20 p.
20. Krasovskiy N. V. *Ispolzovanie energii vetra dlya tseley elektrifikatsii* [Use of wind power for electrification purposes]. *Doklady IX Vsesoyuznogo elektrotehnicheskogo sezda* [Proceedings of the IX All-Union Electrotechnical Congress], 1936, pp. 1–36.
21. Krasovskiy N. V. *Kak ispolzovat energiyu vetra* [How to use wind energy], Moscow – Leningrad, Glavnaya redastiya energeticheskoy literatury Publ., 1936. 170 p.
22. Krasovskiy N. V. *O perspektivakh ispolzovaniya energii vetra* [On the prospects of using wind energy], Simferopol, Krympoligraftresta Publ., 1932. 16 p.
23. Krasovskiy N. V., Sabinin G. Kh. Problema ispolzovaniya energii vetra [The problem of using wind energy]. *Trudy Tsentralnogo Aero-Gidrodinamicheskogo Instituta* [Proceedings of the Central Aero-Hydrodynamic Institute], 1923, issue 2, pp. 1–21.
24. Ramazanova Z. U. *Metody prognozirovaniya vetrovogo energeticheskogo potentsiala regiona* [Methods of Forecasting the Wind Energy Potential of the Region], Kiev, 2007. 14 p.
25. Resuleva N. Sh. Vozobnovlyаемая energetika kak prioritnoye napravlenie innovatsionnogo razvitiya AR Krym [Renewable energy as a priority for innovative development of Crimea]. *Kultura narodov Prichernomorya* [Culture of the peoples of the Black Sea], 2011, no. 197, vol. 2, pp. 52–54.
26. Bagrov N. V. (ed.) *Solnechnaya energetika dlya ustoychivogo razvitiya Kryma* [Solar energy for sustainable development of the Crimea], Simferopol, DOLYa Publ., 2009. 294 p.
27. Bokov V. A. (ed.) *Ustoychivyy Krym. Energeticheskaya strategiya XXI veka* [Sustainable Crimea. Energy Strategy of the XXI century], Simferopol, Ekologiya i mir Publ., 2001. 400 p.
28. Fedosenko L. P., Denisenko O. G., Margalik S. V. Matematicheskoe modelirovanie i metody otsenki resursov vetrovoy energetiki v USSR [Mathematical modeling and methods for estimating the resources of wind power in the Ukrainian SSR], Kiev, IED Publ., 1989. 31 p.
29. Jones R. G., Noguer M., Hassel D. S., Hudgon D., Wilson S. S., Jenkins G. J., Witchell J. F. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*, Exeter, UK, Met. Office Hadley Centre Publ., 2004. 40 p.
30. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov>. (Accessed: 22.03.2016).

РАЗВИТИЕ МАЛОЙ АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ

Дегтярев Кирилл Станиславович, старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, email: kir1111@rambler.ru

Панченко Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, email: pancheska@mail.ru