УДК 621.311.24: 530.19

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНФОРМАТИВНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ МЕТЕОСТАНЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА В КРЫМУ

Бекиров О.С., Воскресенская С.Н., Бекиров Э.А.

Физико-технический институт,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского»,
Республика Крым, г.Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4,
Bekirov.e.a@cfuv.ru

Аннотация. В статье приводится анализ существующих методов прогнозирования ветроэнергетического потенциала. При этом они могут базироваться на статистических данных, полученных для конкретного пункта, где размещена метеостанция, или на физических воздействиях климатических условий в данный момент времени. Рассматриваются существующие методы оценки информативности размещения метеостанций и результаты, полученные при помощи метода ячеек Вороного для Республики Крым. Приведен анализ, на каких участках информативность недостаточна и требуется применение адаптивных статистических моделей прогнозирования.
Предмет исследования: Ветроэнергетика и оценка потенциала ветра на территории Республики Крым.
Материалы и методы: Теоретической основой являются труды отечественных и зарубежных ученых в области ветроэнергетики. В работе использовались аналитические методы исследований, метод ячеек Вороного.
Результаты: Показана и проанализирована информативность размещения метеостанций на территории Республики Крым с точки зрения оценки ветроэнергетического потенциала.
Выводы: Результаты работы позволяют получить представление о том, насколько точной на определенных участках Крыма может быть оценка ветрового потенциала вследствие неравномерного расположения метеостанций, когда необходимо использование разных моделей прогнозирования, в том числе и адаптивных, для получения более точной информации.
Ключевые слова: Ветроэлетростанция, метеостанция, прогнозирование, ячейка Вороного, модель, ветроэнергетический потенциал.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой на пути использования ветровой энергетики и широкого применения ветроэлектрических агрегатов является переменный характер и сложное прогнозирование направления и скорости ветра.

Методы оценки энергии ветра можно различать по следующим факторам: по физическому воздействию и по статистическим данным.

По первому фактору анализируются воздействия атмосферы и ее взаимодействие с поверхностью земли. Второй фактор базируется на статистических данных и результатах многолетних исследований и измерений направления, и скорости ветра. Более детально процедура прогнозирования описана в работах [1, 2, 3].

В любом случае для определения текущих параметров и характеристик ветра и для сбора статистических данных необходимы метеостанции. Они могут быть размещены на территории отдельного административного округа произвольно, в крупных городах и населенных пунктах. Таким образом, не обеспечивается покрытие всей территории.

Целью статьи является анализ информативности размещения метеостанций, используемых для оценки ветрового потенциала в условиях Республики Крым.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Для того чтобы оценить ветровой потенциал на заданной площадке, следует выбрать необходимый перечень исходных данных. Он может меняться для построения эффективной модели оценивания и включать такие данные, как рельеф местности, наличие препятствий, метеоданные.

Для статистической модели прогнозирования используются параметры многолетних наблюдений за климатической обстановкой. С их помощью осуществляется численное прогнозирование погоды (NWP модели) и проводится пространственно-временная корреляция метеоданных для оценки фактической эффективности ветроустановок.

Прогнозирование по физическому воздействию часто используется для начального анализа и сравнения его результатов с результатами статистического метода. Для проведения пространственной корреляции необходимы данные многолетних наблюдений скорости ветра как для выбранной площадки для проектирования ветроэлектростанции (ВЭС), так и для соседних. Модель NWP разработана метеорологами для прогнозирования погоды на больших территориях, в том числе. Хотя в самом простом случае прогнозирование проводится для конкретной точки и затрагивает пространство с радиусом примерно 5 километров. Особенность NWP модели также заключается в том, что она не обеспечивает точных

результатов для долгосрочной перспективы. Для создания NWP модели и оценки ветрового потенциала данной местности топография местности представляется в виде цифровых трехмерных элементов. При моделировании для значительных площадей также предусматривается наличие особенностей рельефа и дополнительно применяется программа, учитывающая препятствия, неровности поверхности, взаимное затенение ветротурбин (например, программный пакет WAsP). Чтобы уменьшить погрешности при корреляции и интерполяции выходных данных проводят сравнение полученных результатов с данными, найденными по физическому воздействию. Результаты исследований показывают, что NWP модель при прогнозировании дает лучший результат. Оценивание ветрового потенциала с помощью традиционных статистических моделей позволяет получить результаты, идентичные получаемым при прямой обработке случайных величин физического воздействия климатических условий.

Разберем более подробно, как осуществляются временные и пространственные корреляции при оценивании ветрового потенциала.

Изначальные данные для проведения оценивания представляются в виде численного ряда. Опираясь на множество накопленных статистических данных, осуществляется идентификация вида зависимости, оценка параметров, разрабатывается математическая модель. Наиболее часто используется интегрированная модель авторегрессии (скользящего среднего) для анализа временных рядов (ARIMA) [4]. Она позволяет работать с нестационарными данными, то есть учитывать сезонность и изменение ветрового потенциала в течение года. Временные ряды можно сделать стационарными путем нахождения разностей некоторого порядка от исходного временного ряда. Другой статистический метод – метод фильтров Калмана [5, 6]. Он использует динамическую модель системы и позволяет получить оптимальную оценку параметра на основе множества последовательных измерений. При этом процесс проходит в два этапа. На первом этапе проводится прогнозирование величины для заданного времени с учетом возможных неточностей при измерениях, а на втором ее корректировка.

Пространственная корреляция необходима для учета изменения скорости ветра на разных площадках. Этот тип моделей корреляции необходим в связи с тем, что не всегда метеостанции располагаются в местности, где в дальнейшем планируется строительство ВЭС. Они требуют большего количества усилий, так как рельеф между двумя рассматриваемыми точками (метеостанцией и площадкой ВЭС) может иметь различные уклоны, изменение свойств подстилающей поверхности и т.д. В этом случае метод приближений позволяет спрогнозировать параметры ветра, но только для ровной местности можно получить более точные данные, а при сложном рельефе возникают значительные погрешности. Для таких случаев разработаны адапривные модели с использованием статистического прогнозирования [7].

В Крыму для оценивания ветроэнергетического потенциала (ВЭП) использовались статистические данные скорости ветра за некоторый краткосрочный промежуток времени [8] и было выявлено, что результаты существенно ниже долгосрочных данных скорости ветра (таблица 1). Особенна велика разница для метеопостов 1 – 3.

Таблица 1. Сравнение краткосрочных и долгосрочных данных скорости ветра
Table 1. Comparison of short-term and long-term wind speed data

№	Метеопост системы TASIS	Год	Высота датчика анемометра, м	Средняя скорость ветра, м/с	Близлежащая отечественная метеостанция	Отношение к средней многолетней скорости ветра
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	«Кировск»	2014	8	4,0	«Нижнегорск»	0,87
2	«Джанкой»	2014	18	6,2	«Джанкой»	0,77
3	«Гвардейское»	2010	24	5,5	«Симферополь»	0,86
4	«Донузлав»	2007	18	4,4	«Евпатория»	0,96
5	«Акташ»	2007	15	5,5	«Мысовое»	0,91

Моделирование ВЭП Крыма осуществлялось с использованием модели NOABL (Numerical Objective Analysis Boundary Layer), разработанной в 1970-е годы в США. В основе модели лежит масс-консистентная теория, разработанная в 1958 г. И.Сасаки для учета распространения выбросов в окружающую среду, и развитая в 1978 г. С.Шерманом для моделирования ветрового потенциала над пересечённой местностью [9]. Компьютерная реализация модели NOABL выполнена в 1978-79 гг. в Департаменте энергетики США.

Расчёты по модели NOABL начинаются со всех доступных наблюдений скорости ветра в интересующем регионе. Эти наблюдения (обычно на метеостанциях) используются в качестве базы оценивания скорости ветра в каждой точке моделируемой трёхмерной области. Модель решает задачу в два этапа. На первом из них рассчитывается начальное приближение ветрового потенциала в каждой точке моделируемой области. Данные наблюдений являются точкой отсчёта, от которой формируется начальное приближение. Но, так как наблюдения являются точечными измерениями,

метод должен обеспечивать решение проблемы распространения данных во все точки области. Вертикальный профиль горизонтальных ветров устанавливается для каждого пункта наблюдений либо по степенному, либо по логарифмическому закону для фиксированной высоты. Выше этой высоты скорость ветра принимается постоянной. После того, как вертикальный профиль ветра установлен, требуется горизонтальная интерполяция начального приближения для всех оставшихся пунктов. Таким образом, эта процедура обеспечивает оценивание начального приближения ветрового потенциала по всей моделируемой области.

На втором этапе проводится процесс уточнения начального приближения данных. Это делается таким образом, что начальное приближение изменяется минимальным образом так, чтобы конечная вычисленная скорость удовлетворяла уравнению непрерывности потока

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} = 0, \quad (1)$$

где u, v, w – координаты скорости.

Дополнительно учитываются условия пограничного слоя рельефа, требующие, чтобы моделируемый ветер был параллелен поверхности. Это требование реализуется с использованием техники вариационного исчисления.

Другой особенностью масс-консистентной подгонки является возможность предпочтения вертикальной или горизонтальной подгонки. Отношение вертикальной к горизонтальной подгонке (τ) формирует важный параметр, управляющий соответствующей подгонкой.

Например, $\tau = 1; \tau < 1; \tau > 1$ характеризуют нейтральное, стабильное и нестабильное состояние атмосферы соответственно.

Нейтральное атмосферное равновесие означает, что подгонка потока не дает предпочтений в вертикальном или горизонтальном направлении. Значение $\tau < 1$ означает, что в потоке преобладает горизонтальная составляющая, так что воздушный поток скорее обойдёт вокруг препятствия, а не выше его. Аналогично, когда $\tau > 1$, подгонка осуществляется преимущественно в вертикальном направлении – поток обойдёт препятствие скорее выше, чем вокруг него.

Опубликованы данные о результатах верификации модели NOABL на острове Оаху (Гавайи) [10]. На острове имеются две гряды с максимальной высотой над уровнем моря 1225 м. Сравнительный анализ показал посредственную корреляцию фактических и расчётных данных – в среднем порядка 0,5. Кроме того, для ряда пунктов имело место существенное расхождение между расчётными и фактическими данными, достигающее 67 %. Такая погрешность моделирования скорости ветра приводит к недопустимо большой погрешности моделирования выработки электроэнергии ВЭС.

Результаты работы [8] показали, что в Крыму имеются территории, позволяющие построить ВЭС общей мощностью 400 МВт. Указанные территории расположены главным образом на северном и южном побережьях Керченского полуострова, а также на северо-восточном побережье Крыма [8]. В соответствии с этими данными вырабатывается стратегия развития [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используется аналитический метод для оценки информативности расположения метеостанций в Крыму и ветрового потенциала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения прогнозирования с высокой степенью точности необходимо, чтобы метеостанции располагались по всей территории, обеспечивая полноценный охват и сбор статистических данных.

Если оценивается потенциал ветра для территории с относительно однородными географическими условиями, то должен выполняться принцип неразрывности, то есть, изменения ветрового режима должны происходить без скачков, для близлежащих пунктов характеристики ветра должны отличаться несущественно. Исходя из данного положения, информативность размещения метеостанций на определённой территории предлагается определять распределением расстояний от каждого пункта территории до ближайшего источника информации. Для анализа информативности размещения метеостанций (МС) на территории Крыма предложены методы, описанные ниже.

1. Метод q-средних расстояний.

Этот метод состоит в отнесении каждого пункта территории Крыма к одному из классов в зависимости от среднего расстояния между данным пунктом и наперёд заданным количеством q ближайших к нему МС. Параметр данного метода q задаётся, исходя из требований к уровню информационной обеспеченности прогноза ВЭП на территории Крыма, и определяется количеством МС, являющимися узловыми при интерполяции соответствующих показателей.

Математическое описание данного метода заключается в следующем:

$$I_0 = \emptyset; \quad (2)$$

$$\mathrm{I_k} = \mathrm{I_{k\text{-}1}} \cup_{\mathrm{i}} \mathrm{argmin}\{\rho_{\mathrm{i}}(\mathrm{A}), \mathrm{i} \in \{1, \dots, \mathrm{n}\} \setminus \mathrm{I_{k\text{-}1}}\},$$

$$k = 1, \dots q; \quad (3)$$

$$\bar{\rho}_{\mathrm{q}}(\mathrm{A}) = \frac{1}{q} \sum_{\forall i \in I_q} \rho_i(A), \quad (4)$$

где q – количество источников данных о характеристиках ветра;

I_q – множество, состоящее из q номеров МС, ближайших к пункту *A*;

$\rho_i(A)$ – расстояние от пункта *A* до *q*-го источника данных;

$\bar{\rho}_q(A)$ – среднее расстояние от пункта *A* до q ближайших МС.

При q=1, исходя из вычисленного максимального расстояния от пункта территории Крыма до ближайшей МС, принято распределение всех пунктов по указанному признаку на восемь классов, представленных в таблице 2 (интервал включает левую и не включает правую границу).

Таблица 2. Классификация пунктов Крыма для оценки информативности покрытия МС

Table 2. Classification of Crimean points to assess the information content of weather stations coverage

№ класса	Расстояние до ближайшей МС, км
1	0,0-6,1
2	6,1-12,2
3	12,2-18,3
4	18,3-24,5
5	24,4-30,6
6	30,6-36,7
7	36,7-42,8
8	42,8-48,9

На рис. 1 представлена карта информационного покрытия Крыма метеостанциями. Показаны как действующие, так и закрытые в настоящий момент, но для которых имеется информация о характеристиках ветра за долгосрочный период в прошлом.

Как пример, при ужесточении требований (q=2 и q=3) информационная обеспеченность Тарханкутского полуострова снижается и на западе, и на востоке из-за того, что одной МС «Черноморское» становится не достаточно, что видно по более светлому фону на карте (рис. 2). Аналогичный вывод можно сделать и для других территорий при прогнозе ВЭП. При этом к зоне с особо низкой информативностью относится территория в окрестности Донузлавского залива, что отрицательно сказалось бы на прогнзирование при расширении Донузлавской ВЭС. Также ужесточение требований является существенным для центральных территорий Крыма, вблизи Арабатской стрелки.

2. Метод диаграмм (ячеек) Вороного.

Для получения представления об информативности данных о ветре, получаемых от МС Крыма, построена соответствующая диаграмма Вороного (рис. 2).

Диаграмма Вороного состоит из ячеек Вороного, которые строятся для каждой МС региона, и представляют собой множество пунктов, для которых данная МС является ближайшей.

Математическая модель при построении диаграммы Вороного выглядит следующим образом. Обозначим дополнительно:

R — множество пунктов территории региона;

$\rho_i(r)$ — расстояние между пунктом r и i-м источником данных, где i=1,…,n.

Диаграмма Вороного представляет собой разбиение множества R на подмножества $\{V_i\}_{i=1}^{n}$ (ячейки Вороного), обладающее следующими свойствами:

$$\bigcup_{i=1}^{n} V_i = R; \quad (5)$$

$$V_i \cap V_j = \emptyset,\ \forall i,\ j = 1, \dots n;\ i \neq j; \quad (6)$$

$$V_i = \bigcup_{r \in R,\ i = argmin \rho_j(r),\ j=1,\dots,n} r. \quad (7)$$

Необходимое информационное покрытие определяется следующими характеристиками ячеек Вороного (ЯВ):

– все ЯВ имеют приблизительно одинаковые площади;

– ЯВ имеют «невытянутые» формы;

– МС располагаются вблизи центров своих ЯВ;

– каждая ЯВ занимает территорию с однородными ветрообразующими условиями.

Анализ ячеек Вороного, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы:

– Площади ячеек распределены более или менее равномерно, за исключением южного берега Крыма вблизи Ялты, где строительство ВЭС маловероятно из-за высокой стоимости земельных участков.

– Ряд ячеек Вороного имеет вытянутою форму (например, для МС «Раздольное», «Голубинка», «Керчь», «Владиславовка»), что повышает вероятность наличия неоднородности ветрового режима территории, занимаемой данной ЯВ.

– В некоторых ЯВ положение МС не «отцентрировано» – например, для МС «Черноморское», «Евпатория», «Мысовое», «Керчь». Это значит, что ветровой режим вдали от МС может существенно отличаться от ветрового режима, исследованного на площадке МС.

Недостаточная репрезентативность информационного покрытия данными долгосрочных наблюдений о ветре с точки зрения однородности ветрообразующих условий территории имеет место в следующих районах Крыма:

– на юго-востоке Керченского полуострова – для пунктов этого района ближайшими являются МС, расположенные на северо-востоке Керченского полуострова (МС «Керчь», МС «Опасное»);

– на юге Керченского полуострова – для этого района ближайшей является МС «Мысовое», расположенная на севере Керченского полуострова;

– на юго-западе Керченского полуострова – для этого района ближайшей является МС «Феодосия», расположенная на юго-востоке Крымского полуострова;

– в центре Крымского полуострова – ячейки Вороного тут иди имеют большие размеры, или слишком вытянутую форму и «обслуживаются» МС, расположенными по краям этих ячеек (например, ячейки Вороного для МС «Симферополь», «Джанкой», «Голубинка», «Раздольное»).

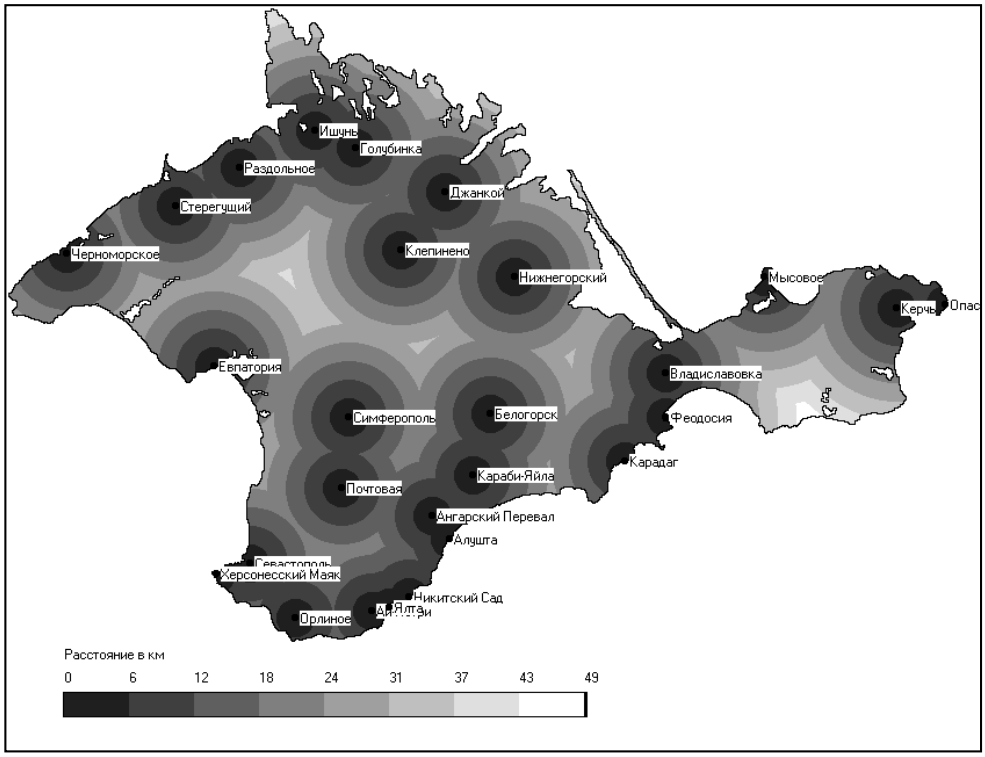


Рис. 1. Карта информационного покрытия Крыма источниками долгосрочной информации о ветре – метеостанциями (*q=1*)

Fig. 1. Map of information coverage of Crimea by sources of long-term information about wind – weather stations (q=1)

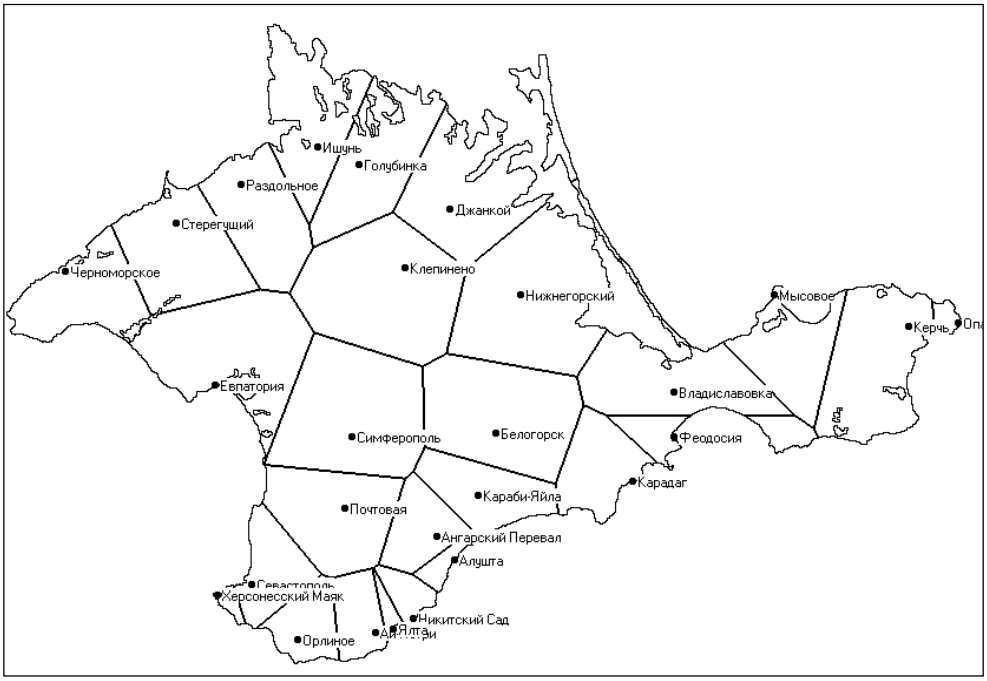


Рис. 2. Диаграмма Вороного для анализа информационного покрытия Крыма метеостанциями при прогнозировании ветрового потенциала

Fig. 2. Diagram of Voronoy for the analysis of the information coverage of the Crimea by weather stations when predicting the wind potential

На настоящий момент на Тарханкутском полуострове и в районе Донузлавского залива уже есть действующие ветроэлектростанции с метеопостами для измерения параметров ветра непосредственно на площадках. В данном случае речь не идет о МС для проведения всесторонних измерений в заданном пункте. Привлечение информации, зарегистрированной установленными в данной местности в разное время специализированными метеопостами и метеопостами действующих ВЭС решает проблему информационного покрытия запада Тарханкутского полуострова, а также района в окрестности Донузлавского залива (рис. 3 и рис. 4).

На рис. 3 представлена карта информационного покрытия для Крымского полуострова, построенная с учётом указанных выше дополнительных источников информации о ветре. Привлечение имеющихся дополнительных источников информации улучшает информационное покрытие Крыма. В то же время, на рис. 3 видно, какие территории всё ещё требуют дополнительных источников информации о ветре для повышения точности и надёжности прогноза ВЭП ВЭС на территории Крыма.

Рассмотрим более подробно адаптивную модель статистического прогнозирования, которая может быть использована в описываемом случае, когда метод ячеек Вороного не позволяет получить достоверную информацию для всей рассматриваемой территории. Такого рода модель описана, например, в работе [1]. Она использует различные прогнозы с определенными весовыми коэффициентами. Результирующая прогнозируемая величина мощности определяется как адаптированная к конкретным условиям комбинация ряда динамических моделей, полученных с помощью стстистических измерений в близлежащих пунктах. Адаптивная модель должна учитывать существенно нелинейную зависимость мощности ВЭС от скорости ветра, а также от других погодных факторов – направления ветра, плотности воздуха и др. При этом предполагается, что одновременно рассматривается несколько прогнозов по разным нелинейным статистическим моделям. Оценка параметров статискических моделей для близлежащих пунктов хорошо учитывает местные условия, а результирующий прогноз отражает адаптированную комбинацию различных моделей. Мощность ВЭС в момент времени $t + h$ предлагается определять, пользуясь соотношением

$$P_{t+h}^{C} = \sum_{k=1}^{K} (\varphi_{tk}^{(h)} \cdot \rho_{t+h}^{(k)}), \qquad (8)$$

где t – текущее время;

h – время, на которое выполняется прогноз;

K – общее количество прогнозов, рассчитанных по разным статистическим моделям;

k – номер прогноза (модели);

$\rho_{t+h}^{(k)}$ - мощность ВЭС в момент времени $t + h$ для k-го прогноза;

$\varphi_{tk}^{(h)}$ – весовые коэффициенты k-го прогноза, зависящие от времени.

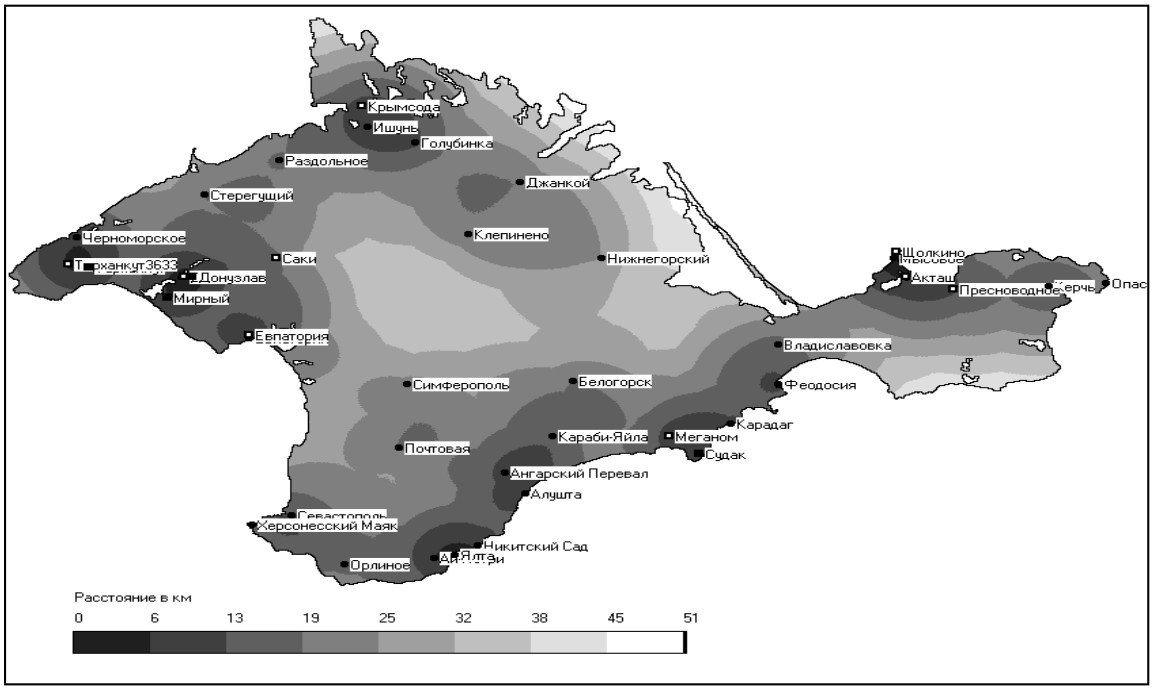


Рис. 3. Карта информационного покрытия Крыма источниками информации о ветре: метеостанциями, специализированными метеопостами и метеопостами действующих ВЭС (*q=3)*

Fig. 3. Map of information coverage of Crimea by sources of information about the wind: weather stations, specialized weather stations and weather stations of existing wind power stations (q=3)

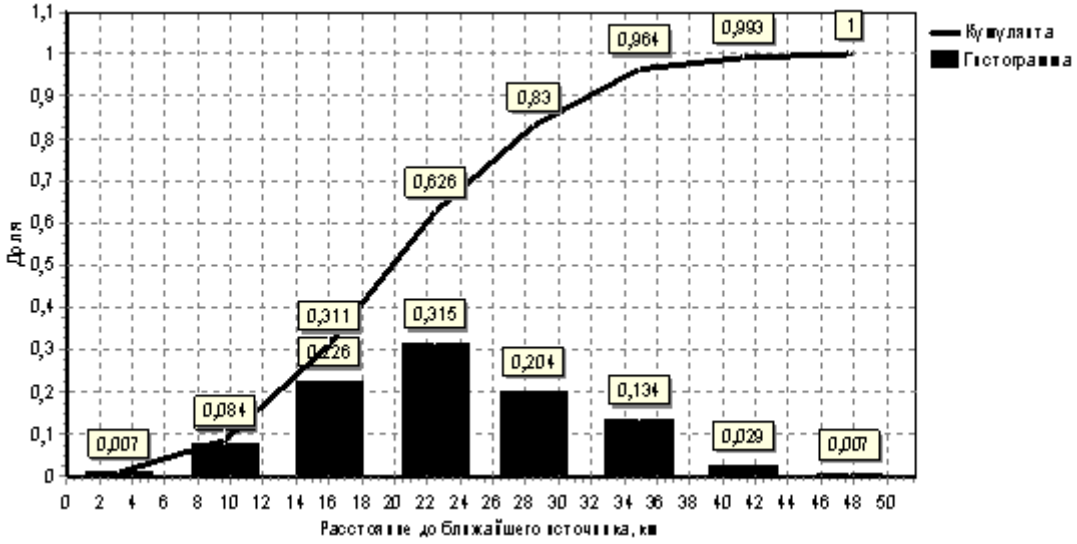


Рис. 4. Распределение расстояний между пунктами Крыма и ближайшими к ним источникам информации о ветре (*q=3*)
Fig. 4. Distribution of distances between the points of the Crimea and the closest sources of information about the wind to them (q=3)

Рассмотрим, как определяется мощность ВЭС для отдельно взятого прогноза. Формула будет включать несколько слагаемых, учитывающих влияние различных факторов

$$\rho_{t+h} = \alpha_{0,t} + P_t(k,c) + W_{t+h|t}(q) + D_{t+h|t} + e_{t+h|t}^{(M_m)}, \quad (9)$$

где $\alpha_{0,t}$ – многопериодная авторегрессиия, отражающая, что выполняется статистическое прогнозирование мощности как временного ряда;

$P_t(k,c) = \sum_{i=1}^{k}(\alpha_{i,t}\rho_{t+1-i} + \alpha_{k+1,t}\rho_{t+h-c})$ – авторегрессивная составляющая мощности ВЭС;

c – константа, предназначенная для учета суточной цикличности;

$W_{t+h|t}(q) = \sum_{i=1}^{q}(\beta_{i,t}v_{t+h|t}^{i})$ – составляющая, учитывающая прогноз скорости ветра;

$D_{t+h|t} = \gamma_{1,t}\sin\left(\frac{2\pi\varphi_{t+h|t}}{360}\right) + \gamma_{2,t}\cos\left(\frac{2\pi\varphi_{t+h|t}}{360}\right)$ – составляющая, учитывающая прогноз направления ветра;

v и φ – соответственно скорость (м/с) и направление ветра;

$e_{t+h|t}^{(M_m)}$ – прогнозируемая погрешность *i*-ой модели;

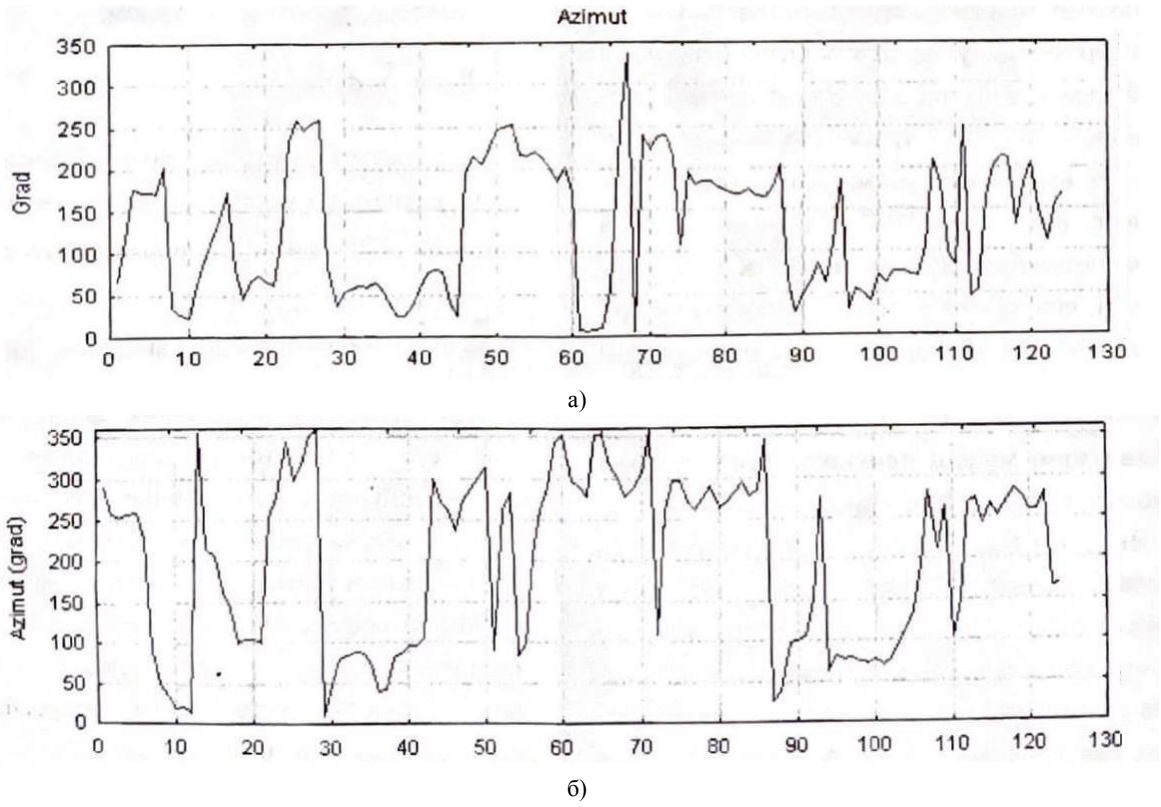
q и *k* – количество параметров регрессии.

Первое слагаемое $\alpha_{0,t}$ учитывает антропогенные факторы при ритмичной работе ВЭС. Остальные слагаемые дополнительно учитывают прогнозируемую скорость ветра с разным количеством параметров авторегрессии, а также аналогичным образом направление ветра.

Вышеприведенная модель может быть адаптирована под различные условия, что учитывается изменением весовых коэффициентов k-го прогноза. Целью ее использования является построение многовариантной регрессии как функции нескольких различных параметров, причем влияние каждого параметра может меняться в зависимости от выбранных критериев оценки. Для построения регрессий можно использовать простейший метод – метод наименьших квадратов. Определение же степени влияния каждого *k*-го прогноза может быть скорее интуитивным, но, тем не менее, значения весовых коэффициентов будут влиять на точность всего прогноза.

Если рассматривать более подробно влияние таких факторов, как скорость и направление ветра, на результат оценивания, то можно сделать вывод, что они оба оказывают существенное влияние. Направление ветра важно, когда в состав ВЭС входит ряд ветроустановок, которые могут полностью или частично затенять друг друга. На такое затенение влияет также рельеф местности. Соответственно, в случае затенения генерация электроэнергии будет уменьшаться. Аналогичная реакция произойдет и при уменьшении скорости ветра. Таким образом, скорость ветра может коррелировать с его направлением, что повышает точность прогноза.

Статистическое прогнозирование может выполняться как для скорости ветра, так и для направления. Например, на рис. 5 показан результат фиксации направлений ветра на площадке Мирновской ВЭС (а) и площадке Солнечная Долина (б) на западе и востоке Крыма за март месяц 2010 года.



а)

б)

Рис. 5. Фиксация направлений ветра на площадке Мирновской ВЭС (а) и площадке Солнечная Долина (б)
Fig. 5. Fixation of wind directions at the site of the Mirnovskaya wind power stations (a) and the site of the Sunny Valley (b)

Наличие корреляции между направлением и скоростью ветра может быть установлено по формуле:

$$r^2 = \frac{(r_{vc} - r_{vs})^2}{1 - r_{cs}^2}, \qquad (10)$$

где $r_{vc} = \mathrm{corr}(v, \cos\theta)$;
$r_{vs} = \mathrm{corr}(v, \sin\theta)$;
$r_{cs} = corr(v, \cos\theta, \sin\theta)$;
θ – направление ветра.

Чем меньше значение корреляции по формуле (10), тем выше вероятность того, что при одинаковых скоростях ветра, но разных их направлениях, прогнозируемые мощности ВЭС будут одинаковыми.

ВЫВОДЫ

Таким образом, был проведен анализ существующих методов оценки ветроэнергетического потенциала. Они чаще всего основаны на сборе статистической информации в пунктах размещения метеостанций. В дальнейшем необходимо проводить пространственно-временную корреляцию, чтобы получить прогноз для других, рядом расположенных участков, так как из-за неровного рельефа местности параметры ветра будут меняться. Чем больше метеостаций на некоторой террирории, тем выше информативность данных. Тем не менее, метеостанции чаще всего располагаются в городах и населенных пунктах, отдаленных друг от друга на различные расстояния. Соответственно, для оценки информативности собранных статистических данных могут использоваться метод q-средних расстояний, метод ячеек Вороного. В статье эти методы применены для Республики Крым. Приведен анализ информативности размещения метеостанций, который показал, что для части территории Крыма необходимо использование адаптивных методов оценки ветроэнергетического потенциала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ma Lei, Luan Shiyan, Jiang Chuanwen, Liu Hongling, Zhang Yan. A review on the forecasting of wind speed and generated power // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. 13. Issue 4. Pp. 915-920.

2. Lawrence R. Martin. Wind energy - the facts: a guide to the technology economics and future of wind power // Journal of Cleaner Production. 2010. 18 (10). Pp. 1122-1123.

3. Freitas Nicksson, Silva Marcelino, Sakamoto Meiry. Wind speed forecasting: a review // International Journal of Engineering Science. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.

4. Кузнєцов М.П. Методи прогнозування вироблення електроенергії електростанціями // Відновлювана енергетика. 2010. №3(22). С. 41- 48.

5. Boone A. Simulation of short-term wind speed forecast errors using a multi-variate ARMA (1,1). Time-series Model // Master thesis at the Royal Institute of Technology in Stockholm. 2005. X-ETS / EES-0513.

6. Solder L. Simulation of wind speed forecast errors for operation planning of multiarea power systems // Conference on Probablilistic Methods Applied to Power Systems. September 2004. 10.1109/PMAPS.2004.243051.

7. Sanchez I.Short-tern prediction of wind energy production // International Journal of Forecasting, Elsevier. 2006. Vol. 22(1). Pp. 43- 56.

8. План развития энергетики Республики Крым. Стратегия развития нетрадиционных источников энергии и создание основ для промышленного сотрудничества. Симферополь. TASIS. 1999. 166 с.

9. Sherman C.A. A Mass-Consistent Model for Wind Fields Over Complex Terrain // J.App.Meteor. 1978. Vol. 17. Pp. 312-319.

10. Rohatgi J.S., Nelson V. Wind characteristics . Canyon, Texas, USA: Alternative Energy Institute. 1994. 239 p.

11. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Крым 2019-2023 годы. – Москва: Научно-Технический центр единой энергетической системы, 2018. – 210 с.

REFERENCES

1. Ma Lei, Luan Shiyan, Jiang Chuanwen, Liu Hongling, Zhang Yan. A review on the forecasting of wind speed and generated power // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. 13. Issue 4, Pp. 915-920.

2. Lawrence R. Martin. Wind energy - the facts: a guide to the technology economics and future of wind power // Journal of Cleaner Production. 2010. 18 (10), Pp. 1122-1123.

3. Freitas Nicksson, Silva Marcelino, Sakamoto Meiry. Wind speed forecasting: a review // International Journal of Engineering Science. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.

4. Kuznetsov M.P. Methods for forecasting electricity produced by power plants // Vidnovlyuvana energetika. 2010. No. 3 (22), Pp. 41-48. (In Ukranian)

5. Boone A. Simulation of short-term wind speed forecast errors using a multi-variate ARMA (1,1). Time-series Model // Master thesis at the Royal Institute of Technology in Stockholm. 2005. X-ETS / EES-0513.

6. Solder L. Simulation of wind speed forecast errors for operation planning of multiarea power systems // Conference on Probablilistic Methods Applied to Power Systems. September 2004. 10.1109/PMAPS.2004.243051.

7. Sanchez I.Short-tern prediction of wind energy production // International Journal of Forecasting, Elsevier. 2006. Vol. 22(1), Pp. 43-56.

8. Plan for the development of energy of the Republic of Crimea. The development strategy of non - traditional energy sources and the creation of foundations for industrial cooperation. Simferopol'. TASIS. 1999, 166 p. (In Russian)

9. Sherman C.A. A Mass-Consistent Model for Wind Fields Over Complex Terrain // J.App.Meteor. 1978. Vol. 17, Pp. 312-319.

10. Rohatgi J.S., Nelson V. Wind characteristics . Canyon, Texas, USA: Alternative Energy Institute. 1994, 239 p.

11. Scheme and program for the development of electric power industry of the Republic of Crimea 2019-2023. Moskva: Nauchno-Tekhnicheskiy tsentr yedinoy energeticheskoy sistemy, 2018. – 210 p. (In Russian)

METHODS FOR ANALYZING THE INFORMATION CONTENT OF THE LOCATION OF WEATHER STATIONS TO ASSESS THE WIND POTENTIAL IN THE CRIMEA

Bekirov O.S., Voskresenskaya S.N., Bekirov E.A.

Institute of Physics and Technology,
V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Republic of Crimea, Simferopol, Academician Vernadsky Avenue, 4, Bekirov.e.a@cfuv.ru

Abstract. The article provides an analysis of existing methods for predicting wind energy potential. At the same time, they can be based on statistical data obtained for a specific point where the weather station is located, or on the physical effects of climatic conditions at a given time. The existing methods for assessing the information content of the location of weather stations and the results obtained using the method of Voronoy's cells for the Republic of Crimea are considered. An analysis is given in which areas the information content is insufficient and the use of adaptive statistical predicting models is required.

Subject: Wind energy and assessment of wind potential on the territory of the Republic of Crimea.

Materials and methods: The theoretical basis is the works of domestic and foreign scientists in the field of wind energy. The work used analytical research methods, the method of Voronoy's cells.

Results: The information content of the location of weather stations on the territory of the Republic of Crimea from the point of view of assessing the wind energy potential is shown and analyzed.

Conclusions: The results of the work allow us to get an idea of how accurate the assessment of wind potential can be in certain areas of the Crimea due to the uneven location of weather stations, when it is necessary to use different predicting models, including adaptive ones, to obtain more accurate information.

Key words: Wind power station, weather station, predicting, Voronoy's cell, model, wind energy potential.