МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА – ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Е.А. Киселева, Е.Н. Киселев, А.В. Погорелов

Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия, pogorelov_av@bk.ru

MODELING OF THE WIND VELOCITY FIELD – RENEWABLE SOURCES OF ENERGY IN KRASNODAR REGION

E.A. Kiseleva, E.N. Kiselev, A.V. Pogorelov

Kuban State University, Krasnodar, Russia, pogorelov_av@bk.ru

Abstract. Assessment of the potential of wind energy in the Krasnodar region obtained by mapping the wind speed at the height of 50, 80 and 100 meters. The technique of modeling, based on the global experience of assessing the potential of wind energy, including data on the average annual wind speed at the meteorological network and estimates of surface roughness. The algorithm for automated mapping.

Keywords: wind speed, wind energy, modeling, GIS technology, Krasnodar region, land use, surface roughness.

Введение. Постановка проблемы. Ветровая энергетика – одно из ключевых направлений современной мировой энергетики. Рост вклада возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в глобальное потребление энергии определяется рядом обстоятельств, из которых выделим неуклонное потребление энергии в мире, конечность традиционных видов топлива, поиск экологически безопасных источников энергии, стремление многих стран и регионов к энергетической безопасности. Во многих европейских странах (Германия, Испания, Дания, Португалия, Ирландия и др.) в результате роста инвестиций в ветроэнергетику, сопровождаемого последовательным увеличением мощностей энергоустановок, абсолютный вклад ВИЭ в потребление энергии неуклонно растет.

На огромной территории России ресурсы ветроэнергетики распределены крайне неравномерно, поэтому ее экономическая эффективность в значительной мере зависит от местных условий. Краснодарский край – энергодефицитный регион с централизованным энергоснабжением, в котором остро стоит проблема региональной энергетической безопасности. Степень использования ВИЭ в энергобалансе края не превышает 2%. Эффективный способ решения проблемы энергетической безопасности – развитие региональной альтернативной энергетики. В Краснодарском крае априори имеются благоприятные географические предпосылки для этого. Очевидно, что развитие автономной и распределенной энергетики с использованием ВИЭ в ближайшие годы во многом будет определяться инициативой региональных властей, а также частного бизнеса. Всестороннее исследование пространственно распределенной ветровой энергии как природного возобновляемого ресурса и оценка перспектив ее использования на территории Краснодарского края ранее детально не проводились. По данным [2] на территории края запасы потенциальной энергии ветра в десятки раз меньше запасов потенциальной энергии солнца, однако целесообразна совместная утилизация солнечно-ветровых ресурсов, обеспечивающая стабильность вырабатываемой суммарной энергии в течение года. В этой связи необходима оценка региональных ветровых ресурсов в аспекте развития энергетики, нахождение ее места в региональном энергетическом комплексе, что и является задачей настоящей работы.

Мощность турбин современных ветрогенераторов достигает 1,0...3,0 Мвт, при этом она постоянно растет. Ветроэнергетическая установка высотой более 50 м – это сложное инженерное сооружение с развитой инфраструктурой, эффективная работа которой в значительной мере зависит от правильного расчета потенциала ветровой энергии. Завышенная при расчетах скорость ветра (и турбины) способствует снижению эффективности; заниженная скорость ветра при определении потенциала приводит к чрезмерным нагрузкам и повышенной вероятности разрушения конструкции, отказу лопастей и т.п.

В своем анализе мы опирались на опыт оценки потенциала ветровых ресурсов, реализующий разные подходы [10, 12]. Особое внимание уделено применению ГИС-технологий [7, 15], облегчающих нахождение закономерностей пространственного распределения скоростей ветра в регионе. Учитывалось важное обстоятельство: подобный опыт ориентирован на действующие разработки (в том числе и применяемые конструкции ветроэнергетических установок) с учетом их экономического и экологического обоснования.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных данных использованы климатические нормы скорости ветра на станциях Краснодарского края и приграничных территорий [5]. Более поздние исследования с применением удлинённых рядов наблюдений [4] показали статистическую надежность средних многолетних показателей в изданных Справочниках по климату.

Используемый нами массив представлен данными 66 станций с соответствующими месячными нормами скорости ветра, а также относительными высотами измерения скорости ветра (табл. 2). Расширение сети станций за счет пунктов измерений в приграничных регионах (13 станций) обусловлено стремлением уменьшить погрешности моделирования поля ветра на периферии Краснодарского края.

Необходим перерасчет скорости ветра с высоты флюгера на высоту оси ротора ветроэнергетической установки. Скорость ветра, измеренная на заданной высоте (10 м) может быть экстраполирована на высоту ветрогенераторов с применением модифицированного степенного закона [11] или степенного закона изменения мощности с показателем 1/7 [12] и определяется следующим соотношением:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{\alpha_m} \quad (1)$$

где V_1 – среднегодовая скорость ветра на высоте Z_1 , V_2 – средняя скорость ветра на высоте экстраполяции (итоговая переменная), Z_1 – высота измерений скорости ветра на метеорологических станциях (10 м), Z_2 – высота ветрогенераторов, α_m – показатель, зависящий от шероховатости физической поверхности и определяемый эмпирически.

Существуют разные способы расчета степенного показателя в формуле (1). Так, в работе [9] представлены значения $0,23 \pm 0,03$; в [Newstein, 1976] при измерениях на разных высотах расчетные значения α_m достигают 0,34; для Украины в ряде работ значение принимается равным 0,167 [1]. В последней публикации степенной показатель в формуле (1) в зависимости от характера поверхности (от водной поверхности до городов с большими зданиями) варьирует в пределах 0...0,44.

В формуле (1) степенной показатель α_m определяется из соотношений

$$\alpha_m = A_m + b \ln V_1, \quad (2)$$

где

$$A_m = \frac{1}{\ln \frac{Z_g}{Z_0}} + \frac{0,088}{\left[1 - 0,008 \ln \frac{Z_1}{10} \right]}; \quad (3)$$

$$b = - \frac{0,008}{\left[1 - 0,008 \ln \frac{Z_1}{10} \right]}; \quad (4)$$

$$Z_g = (Z_1 Z_2)^{1/2}; \quad (5)$$

Z_0 – шероховатость поверхности.

Расчеты скорости ветра предполагают определение показателя шероховатости поверхности, влияющей на движение воздуха в приземном слое. Как известно, степень деформации поля ветра зависит от линейных размеров препятствия. В ветроэнергетике считается, что полное восстановление характеристик ветрового потока происходит на расстоянии от препятствия не меньшем, чем его десятикратная высота [3]. В соответствии с методикой [15] скорость ветра рассчитывается на относительных высотах 50, 80 и 100 м, т.е. для соответствующих высот осей ротора ветроэнергетических установок разных конструкций.

Для определения показателя шероховатости поверхности, как это предусмотрено [15], использовалась база данных землепользования CORINE Land cover data (CLC) (рис. 1) [8]. Данный источник представляет собой карту землепользования Европы по состоянию на 2006 г. с разрешением 250×250 м, отражающую 44 класса земель (землепользования). Каждому классу земель свойственен определенный показатель шероховатости (табл. 1) [15].

Рис. 1. Классы земель на территории Краснодарского края по данным CORINElandcover

Таблица 1

Шероховатость поверхности разных категорий земель / землепользования [15]

Категория земель / землепользования по классификации CLC	Шероховатость поверхности, м
Земли под жилой застройкой	1,2
Леса	0,75
Парки, кустарники, гари	0,6
Земли, поднеоднородной жилой застройкой; промышленные или торговые зоны; портовые зоны; строительные площадки; площадки для спорта и отдыха	0,5
Неоднородные сельскохозяйственные земли; сельскохозяйственные земли со значительной частью естественной растительности; сельскохозяйственные земли с областями леса	0,3
Виноградники; плодовые сады и ягодные плантации; оливковые сады	0,1
Однолетние культуры с участками многолетних культур; земли под автомобильными и железными дорогами	0,07
Неорошаемые земли; постоянно орошаемые земли; рисовые поля; внутренние болота; солончаки	0,05
Пастбища; естественные луга; пустынные земли	0,03
Аэропорты; места добычи полезных ископаемых; свалки; голые скалы; участки с редкой растительностью	0,005
Ледники и вечные снега; торфяные болота; соленые болота; приливные отмели	0,001
Пляжи, дюны, пески; водотоки, водоемы; прибрежные лагуны; устья рек; моря и океан	0

При построении карты распределения шероховатости поверхности α_m (рис. 2) мы воспользовались данными CORINE Landcover и эмпирических показателей (табл. 1). При этом сохранено исходное разрешение – 250 м. Помимо шероховатости поверхности определяющей переменной скорости ветра на заданной высоте служит показатель приземной скорости ветра (V_1). Моделирования полей скорости ветра выполнено в программном комплексе ArcGIS (Esri), обеспеченном, кроме прочего, инструментами гестатистического анализа и разнообразными алгоритмами построения геоповерхностей.

Рис. 2. Шероховатость поверхности территории Краснодарского края

Моделирование поля среднегодовой скорости ветра в приземном слое выполнено методом радиальной базисной функции (radial basis function –RBF) с применением функции сплайн с натяжением (Spline with tension). Методу RBF отдано предпочтение в виду возможности создания сглаженных поверхностей без разрывов полей при их относительно слабых изменениях. Последние априори свойственны модели анализируемой характеристики. Для построения этой поверхности использовались данные среднегодовой скорости ветра на измеряемых относительных высотах (рис. 3). В качестве относительной высоты измерений скорости ветра в приземном слое принята отметка 10 м.

Для автоматизированного моделирования полей скорости ветра на высотах 50, 80 и 100 м в приложении ModelBuilder создана модель Wind Extrapolation (рис. 4). Данная модель оперирует следующими входными данными: растровое изображение поверхности среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м, растровое изображение шероховатости поверхности; константы – высота измерений на метеорологических станциях и заданная высота ветрогенератора. Посредством алгоритма, включающего формулы (2–5), выполнен расчет нужных переменных Z_b , b , A_m и α_m . На завершающем этапе по формуле (1) построены поля скорости ветра на заданных высотах.

Рис. 3. Среднегодовая скорость ветра на относительной высоте 10 м на территории Краснодарского края

Рис. 4. Модель Wind Extrapolation для автоматизированного построения поля скорости ветра на заданной высоте

Результаты. Построенные карты скорости ветра на соответствующих высотах на территории Краснодарского края показаны (рис. 5). Наиболее высокий потенциал ветроэнергетики, судя по полученным

картам, свойственен участкам азовского побережья Краснодарского края в районе Ейского и Таманского полуостровов, а также черноморскому побережью в его северо-западной части. Здесь среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м колеблется в диапазоне 7,5...11,0 м/с, а на высоте 100 м достигает 10–12 м/с. Вертикальный градиент скорости ветра, рассчитанный с использованием формулы (1) и соответствующих карт, достигает от 0,04 до 0,42 м/с на 10 м, что в составляет приращение показателя от 7,1 до 18,6% в интервале высот от 50 до 100 м.

Заметим, что в горной части края простая интерполяция с опорой на существующую сеть метеорологических станций приводит к искажению истинного поля ветра. Редкие станции (Даховская, Гузерипль, Зубровый Парк, Ачишхо, Красная Поляна) располагаются, как правило, в зоне ослабления ветра или «ветровой тени». Исключение – станция Мархотский Перевал, расположенная вблизи гребня хребта, где скорость ветра за счет сближения воздушных токов усиливается, что и находит отражение в среднегодовых показателях (9,3 м/с). Оценка скорости ветра в горах требует учета возмущающего влияния мезомасштабных форм рельефа с образованием разнообразных аэродинамических эффектов и местных горных ветров. В нашем моделировании в таком учете не было необходимости, поскольку малоосвоенные горные территории не представляют интереса с позиции массового развития ветроэнергетики.

Выводы. По данным 66 метеорологических станций методом интерполяции (РБФ – сплайн с натяжением) построена карта распределения среднегодовой скорости ветра на высоте фактических измерений для территории Краснодарского края. Среднегодовая скорость ветра в границах региона варьирует в широких пределах – от 1,3 до 9,3 м/с. Путем экстраполяции [11, 12] выполнены расчеты среднегодовой скорости ветра на относительных высотах 50, 80 и 100 м. При этом использовались сведения о шероховатости поверхности, представленные в европейской базе данных землепользования CORINElandcover по состоянию на 2006 г.

Автоматизация расчетов достигнута с помощью разработанной модели геообработки в среде программы ArcGIS. Полученные данные, отражающие фоновые показатели скорости ветра в равнинной части Краснодарского края, могут быть применены для оценки соответствующего потенциала ветроэнергетики внутри региона. Установлено, что наиболее перспективными полигонами развития ветроэнергетики являются участки азовского побережья Краснодарского края в районе Ейского и Таманского полуостровов, а также черноморского побережья в его северо-западной части.

Рис. 5. Среднегодовая скорость ветра на высотах 50 м (а), 80 м (б) и 100 м (в)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Голубенко Н. С., Довгальук С. И., Фельдман А. М., Худик В. Б. О зависимости скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности //Проектно-конструкторскоетехнологическое бюро «КОНКОРД» – Режим доступа: <http://wind.dp.ua>
Golubenko N. S., Dovgalyuk S. I., Feldman A. M., Hudik V. B. O zavisimosti skorosti vetra ot vyisoty s uchetom relefa mestnosti [On the dependence of the wind speed on the height with the terrain], Proektno-konstruktorskoe tehnologicheskoe byuro «KONKORD», Rezhim dostupa: <http://wind.dp.ua>
2. Дробышев А.Д. Потенциальные возможности солнечно-ветровой энергетики в аграрных районах Краснодарского края // Аграрная география в современном мире: сб. науч. тр. / под ред. В.Н. Тюрина. Краснодар: Кубанский гос. ун-т. 2014. С. 241–244.
Drobyshev A.D. Potentsialnyie vozmozhnosti solnechno-ventrovoy energetiki v agrarnyih rayonah Krasnodarskogo kraia [The potential of solar-wind energy in rural areas of the Krasnodar Territory], Agrarnaya geografiya v sovremennom mire, Krasnodar, Kubanskiy Gosudarstvennyi universitet, 2014. pp. 241–244 (in Russian).
3. Де Рензо Л., Шефтер Я.И. Ветроэнергетика //М.: Энергоатомиздат, 1982.271 с.
De Renzo L., Shefter Ya.I. Vetroenergetika [Wind power], Energoatomizdat, Moscow, 1982, 271 p. (in Russian).
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, части 1–6, вып. 13. Л., Гидрометеоиздат. 1990. 724 с.
Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR [Research and Applied USSR Climate Reference Book]No 3. Part 1–6, V. 13. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990. 724 p. (in Russian).
5. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Часть 3. Ветер/ Подред. Т.И. Иванченко.Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 332 с.
Pod red. T.I. Ivanchenko. Spravochnik po klimatu SSSR. Veter [USSR Climate Reference Book.Wind], Gidrometeoizdat, Saint Petersburg, 1967, V. 13, No 3, 332 p. (in Russian).
6. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра// М., Энергоатомиздат, 1983, 199 с.
Shefter Ya.I. Ispolzovanie energii vetra [The use of wind energy], Energoatomizdat, Moscow, 1983. 199 p. (in Russian).
7. Hossain J., Sinha V., Kishore V.V.N. A GIS based assessment of potential for windfarms in India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 36. P. 3257–3267.
8. Geographic database of land use CORINE land cover data. European Environment Agency (2015). Available at: http://projects.eionet.europa.eu/leac/library/globcorine/globcorine_lczip. (accessed 4 April 2015).
9. Justus C.G., Mikhail A. Height Variations of Wind Speed and Wind Distributions Statistics //Geophysical Research Letters. 1976. Vol. 3. P. 251–264.
10. Kaltschmitt M., Wiese A., Steicher W. Renewable energy: technological foundations economical and environmental aspects // Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 2007.P. 295–308.
11. Mikhail A.S. Height extrapolation of wind data// Journal of Solar Energy Engineering. 1985. 107 p.
12. Kishore V.V.N. Renewable energy Engineering & technology: a Knowledge Compendium//Teri Press, New Delhi. 2008, pp. 445–501.
13. Newstein H. An Automated Meteorological Instrumentation and Observing System on a 1000 ft TV Tower // Drexel Univ., Final Report, ESSA/SDO Contract Cwb. – 11038, 1976.P. 12–15.
14. Pogorelov A.V., Kovaleva E.A., Melnikova A. Overview of wind power development: Russia and Germany // Materiały Międzynarodowej konferencji naukowo–praktycznej «Podstawowe i stosowane nauki – 2014». – Access mode: http://www.rusnauka.com/35_FPN_2014/Geographia/6_180232.doc.htm
15. Sliz-Szkliniarz B, Vogt J. GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko–Pomorskie Voivodeship. Karlsruhe // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Germany. 2007. Vol. 15. P. 1696–1707.