

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-1
УДК 44.39.03

© Кангаш А.И., Костеневич А.С., Марьяндышев П.А.,
Любов В.К., 2018

Кангаш Алексей Игоревич

Магистр Высшей школы энергетики,
нефти и газа, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: kangash95@gmail.com

Kangash Aleksey Igorevich

Master student of the Higher School of Energy,
Oil and Gas, Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: kangash95@gmail.com

Костеневич Алексей Сергеевич

Бакалавр Высшей школы энергетики,
нефти и газа, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: Alexey.Kostenevich@yandex.ru

Kostenevich Aleksey Sergeevich

Bachelor of the Higher School of Energy,
Oil and Gas, Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: Alexey.Kostenevich@yandex.ru

Марьяндышев Павел Андреевич

Кандидат технических наук,
директор Высшей школы энергетики,
нефти и газа, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: p.marjyandishev@narfu.ru

Maryandyshev Pavel Andreevich

PhD in Technical Sciences,
Director of the Higher School of Energy,
Oil and Gas, Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: p.marjyandishev@narfu.ru

Любов Виктор Константинович

Доктор технических наук, профессор,
Северный (Арктический) федеральный
университет им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: vk.lubov@mail.ru

Lyubov Victor Konstantinovich

Doctor of technical sciences, Professor,
Northern (Arctic) Federal University named
after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: vk.lubov@mail.ru

**ОЦЕНКА
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПОТЕНЦИАЛА СОЛОВЕЦКОГО
АРХИПЕЛАГА И ВЫБОР
ОПТИМАЛЬНОЙ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ**

**WIND RESOURCE ASSESSMENT
OF THE SOLOVETSKY
ARCHIPELAGO AND SELECTION
OF OPTIMAL WIND TURBINE**

Аннотация. Выполнена оценка ветроэнергетического потенциала Соловецкого архипелага. Сформирована выборочная совокупность скоростей ветра, вычислены среднемесячная и среднегодовая скорости. Проведена проверка статистической гипотезы о применимости распределения Вейбулла для аппроксимации результатов измерений скорости ветра, найдены параметры распределения. Рассмотрен ряд ветроэнергетических установок (ВЭУ), для которых вычислена среднегодовая производительность. Выполнен выбор оптимальной ВЭУ.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка, ветроэнергетическая установка, скорость ветра, функция распределения Вейбулла

Abstract. Wind resource assessment of the Solovetsky archipelago, which is included in the UNESCO World Heritage List, was carried out. The sample of wind speeds was chosen. Annual and monthly wind speed was calculated. The statistical hypothesis of wind speed distribution described using the Weibull distribution function was confirmed. The distribution parameters were found. A number of wind turbines were analyzed annual energy production for those wind turbines was calculated. The optimal wind turbine was selected.

Keywords: diesel generator set, wind turbine, wind speed, Weibull distribution function

Введение

На нашей планете насчитывается более 50 000 островов, на которые приходится 17 % общей площади суши [10]. Острова, находящиеся в удалении от материка, часто зависят от импорта ископаемого топлива, которое обычно является дорогостоящим из-за транспортных издержек [1]. Поэтому удаленные острова часто являются идеальными объектами для технико-экономического обоснования и внедрения независимых энергетических систем, основанных на использовании альтернативных источников энергии [3], [5], [9].

В России существуют удаленные территории, которые зависят от поставок топлива с материка. Примером являются Соловецкие острова, находящиеся в Арктической зоне РФ, где отопительная нагрузка имеет большое значение ввиду суровых климатических условий. Производство тепловой и электрической энергии обеспечивается двумя дизельными электростанциями (ТЭС и ДЭС), оснащенными дизель-генераторными установками (ДГУ) и водогрейными котлами. Дизельное топливо завозится на архипелаг два раза в год во время летней и осенней морской навигации. Учитывая количество выбросов загрязняющих веществ ДГУ, а также стоимость транспортировки дизельного топлива на архипелаг, часть электрической нагрузки следует покрывать за счет внедрения альтернативных источников энергии. На климат Соловецких островов значительное влияние оказывают ветра, поэтому необходимо проанализировать возможность внедрения ветроэнергетических установок.

В данной работе рассматривается вариант, при котором ветроэнергетические установки покрывают около 300 кВт. Таким образом, необходимая среднегодовая производительность ВЭУ должна составлять 2,63 МВт·ч. Учитывая, что всего за 2016 год в поселке Соловецкий было выработано 8,60 МВт·ч электроэнергии, предполагаемая ВЭУ будет производить около 30 % необходимой электроэнергии.

Целью данной работы является оценка ветроэнергетического потенциала Соловецкого архипелага с последующим выбором оптимальной ветроэнергетической установки и расчетом ее среднегодовой производительности на основе функции распределения Вейбулла.

Основная часть

Для оценки ветроэнергетического потенциала Соловецкого архипелага необходимо знать среднюю скорость ветра за определенный период времени. Для вычисления среднесуточной, среднемесячной и среднегодовой скорости ветра была составлена выборочная совокупность [4], которая состоит из ряда скоростей ветра, измеренных через равные шестичасовые интервалы времени (3:00, 9:00, 15:00, 21:00) ежедневно в течение 2017 года.

Чаще всего прогнозирование скорости ветра осуществляется с помощью функций распределения вероятностей. Было установлено, что функция распределения Вейбулла дает приемлемое представление об изменении средней скорости ветра в течение года для различных территорий. Достоверность модели распределения Вейбулла была подтверждена многими исследователями [6]–[8]. Функция распределения Вейбулла может быть представлена следующим уравнением [2]:

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}, \quad (1)$$

где U – скорость ветра, м/с; k – параметр формы; c – параметр масштаба, м/с.

Математическое ожидание $\bar{U}$ и дисперсия распределения Вейбулла D определяются по уравнениям [12]:

$$\bar{U} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad (2)$$

$$D = c^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right], \quad (3)$$

где $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \cdot e^{-t} \cdot dt$ – гамма-функция.

В данной работе вычисление гамма-функции осуществлялось с помощью программного обеспечения Microsoft Excel.

Для обработки эмпирических данных использовался метод, суть которого состоит в том, что весь диапазон возможных скоростей ветра разбивался на интервалы с шагом 2 м/с. При этом определялось сколько раз (n_i) скорость ветра за время наблюдения попадала в соответствующий интервал. Если N – число измерений скорости ветра, тогда относительная частота попадания скорости ветра в i -й интервал w_i равна:

$$w_i = \frac{n_i}{N}. \quad (4)$$

Выборочная средняя скорость ветра $\bar{U}_s$ определяется по формуле:

$$\bar{U}_s = \sum_{i=1}^m w_i \cdot U_i, \quad (5)$$

где U_i – середина i -го интервала, м/с; m – число интервалов.

Исправленная выборочная дисперсия вычисляется по формуле:

$$S^2 = \frac{m}{m-1} \sum_{i=1}^m w_i \cdot (U_i - \overline{U_s})^2. \quad (6)$$

Приравняв выборочную среднюю скорость и дисперсию из уравнений (5) и (6) к математическому ожиданию и дисперсии распределения Вейбулла из уравнений (2) и (3), получаем трансцендентное уравнение относительно параметра k :

$$f(k) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - \frac{S^2}{\overline{U_s}^2} - 1 = 0. \quad (7)$$

Решение данного уравнения осуществляется методом бисекции.

Параметр масштаба выражается из уравнения (2) и рассчитывается по формуле:

$$c = \frac{\overline{U_s}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}. \quad (8)$$

После нахождения параметров функции распределения выполнялась проверка гипотезы о том, что использованные результаты измерения скорости ветра согласуются с функцией распределения Вейбулла. Одним из вариантов является проверка с помощью критерия согласия Пирсона.

Наблюдаемое значение критерия Пирсона χ^2 вычисляется по следующей формуле [11]:

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i}, \quad (9)$$

где p_i – вероятность попадания скорости в i -й интервал:

$$p_i = \begin{cases} F(U_{2i}) - F(U_{1i}), & i = 1, 2, \dots, m-1, \\ 1 - F(U_{1m}), & i = m, \end{cases} \quad (10)$$

где $F(U_{1i})$ – значение функции левой границе i -го интервала; $F(U_{2i})$ – значение функции правой границе i -го интервала.

Была выдвинута нулевая гипотеза о соответствии выборочного распределения теоретическому закону, которая проверялась путем сравнения вычисленной по формуле (9) величины с критическим значением $\chi_{\alpha, n}^2$, найденным по таблице квантилей распределения χ^2 для уровня значимости α и числа степеней свободы $n = s - r - 1$, где s – число интервалов; r – число параметров, оцениваемых по рассматриваемой выборке. Если выполняется неравенство $\chi^2 \leq \chi_{\alpha, n}^2$, то нулевую гипотезу не отвергают. При несоблюдении указанного неравенства принимают альтернативную гипотезу о принадлежности выборки неизвестному распределению.

Скорости ветра на разных высотах различны. Метеослужбы регистрируют скорость ветра на стандартной высоте флюгера – 10 м. Высота ступицы ВЭУ может

варьироваться в широком диапазоне. Поэтому для определения скорости ветра на различных высотах пользуются эмпирической зависимостью степенного вида:

$$U_2 = U_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (11)$$

где U_1 – скорость ветра, измеренная на высоте h_1 , м/с; U_2 – скорость ветра на высоте h_2 , м/с.

Показатель степени принимается равным $m = 1/7$.

После пересчета скоростей ветра на предполагаемую высоту ступицы ВЭУ 50 м рассчитываются параметры функции распределения Вейбулла, с помощью которых возможно вычислить наиболее вероятную скорость ветра (U_{mp}) и скорость, обеспечивающую наибольший вклад в выработку электроэнергии ($U_{max.E}$). Поскольку ВЭУ работает максимально эффективно при номинальной скорости, необходимо, чтобы номинальная скорость и скорость, обеспечивающая наибольший вклад в выработку энергии, были максимально приближены друг к другу.

$$U_{mp} = c \cdot \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k}, \quad (12)$$

$$U_{max.E} = c \cdot \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{1/k}. \quad (13)$$

Одним из критериев выбора оптимальной ВЭУ является показатель среднегодовой производительности, которую можно рассчитать по формуле:

$$W_{turb} = T \cdot \sum_{i=1}^m p_i(U_i) \cdot N_i(U_i), \quad (14)$$

где m – количество интервалов скоростей ветра; T – общее число часов работы ВЭУ в год; $p_i(U_i)$ – повторяемость скорости ветра для i -го интервала; $N_i(U_i)$ – выходная мощность ВЭУ для i -го интервала, кВт (определяется по рабочей характеристике ВЭУ как среднее значения для данного интервала).

По результатам анализа скоростей ветра, измеренных через шестичасовые интервалы времени ежедневно в течение 2017 года, были определены среднесуточные, среднemesячные и среднегодовые скорости ветра на высотах 10 и 50 м (рис. 1). Максимум среднemesячных скоростей для Соловецкого архипелага приходится на холодное время года (рис. 1) и совпадает с сезонным пиком потребления тепловой и электрической энергии.

С использованием формул (1)–(11) были рассчитаны параметры функции распределения вероятностей и проведена проверка гипотезы о том, что результаты измерения скорости ветра согласуются с функцией распределения Вейбулла. Результаты представлены в табл. 1–2.

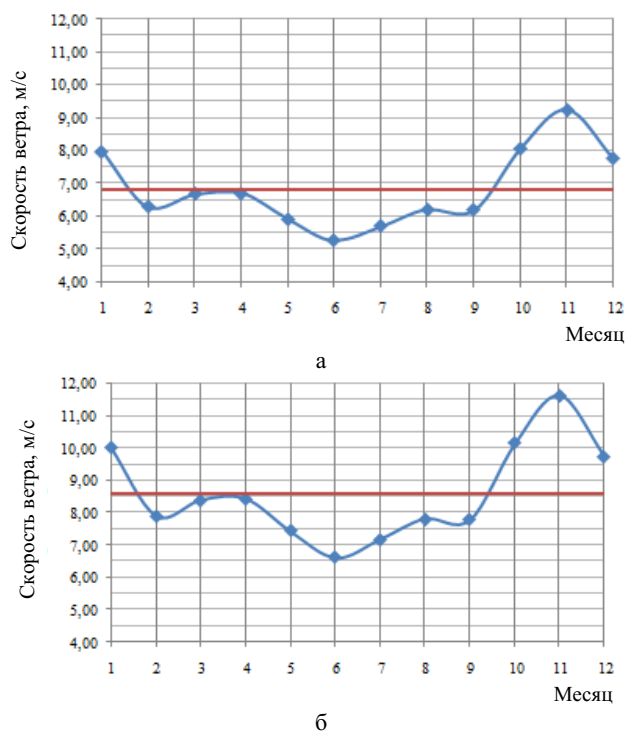


Рис. 1. Среднемесячная и среднегодовая скорость ветра на высотах 10 м (а) и 50 м (б)

Таблица 1

Параметры функции распределения вероятностей

Наименование параметра	Высота 10 м	Высота 50 м
Выборочная средняя скорость, $\overline{U_s}$, м/с	6,86	8,59
Исправленная выборочная дисперсия, S^2	8,28	12,50
Параметр формы, k	2,558	2,611
Параметр масштаба, c	7,730	9,669
Критерий согласия Пирсона, χ^2	6,66	10,90
Критическое значение Пирсона, $\chi^2_{\alpha,n}$	16,81	20,09

Таблица 2

Эмпирическая и теоретическая вероятность попадания скорости ветра в интервал для высот 10/50 м

Диапазоны скоростей, м/с	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
Относительная частота, w_i	$\frac{0,014}{0,000}$	$\frac{0,134}{0,066}$	$\frac{0,247}{0,167}$	$\frac{0,288}{0,241}$	$\frac{0,195}{0,208}$	$\frac{0,085}{0,159}$	$\frac{0,030}{0,099}$	$\frac{0,008}{0,036}$	$\frac{0,000}{0,019}$	$\frac{-----}{0,005}$	$\frac{-----}{0,000}$
Вероятность попадания скорости в интервал, p_i	$\frac{0,031}{0,016}$	$\frac{0,138}{0,079}$	$\frac{0,238}{0,155}$	$\frac{0,257}{0,207}$	$\frac{0,191}{0,208}$	$\frac{0,099}{0,163}$	$\frac{0,036}{0,100}$	$\frac{0,009}{0,048}$	$\frac{0,002}{0,018}$	$\frac{-----}{0,005}$	$\frac{-----}{0,001}$

Так как $\chi^2 \leq \chi^2_{a,n}$, то выдвинутая гипотеза считается подтвержденной, и, следовательно, распределение Вейбулла хорошо аппроксимирует результаты измерения скорости ветра в данной местности. Графики теоретического и эмпирического распределения вероятностей скорости ветра представлены на рис. 2.

Для выборочной совокупности скоростей ветра на высоте 50 м по формулам (12), (13) получены значения наиболее вероятной скорости ветра и скорости, обеспечивающей наибольшую выработку электроэнергии, которые составили: $U_{mp} = 8,04$ м/с и $U_{max.E} = 12,02$ м/с. Таким образом, зная, что ВЭУ работает наиболее эффективно при номинальной скорости, необходимо, чтобы она была максимально близка к значению 12,02 м/с.

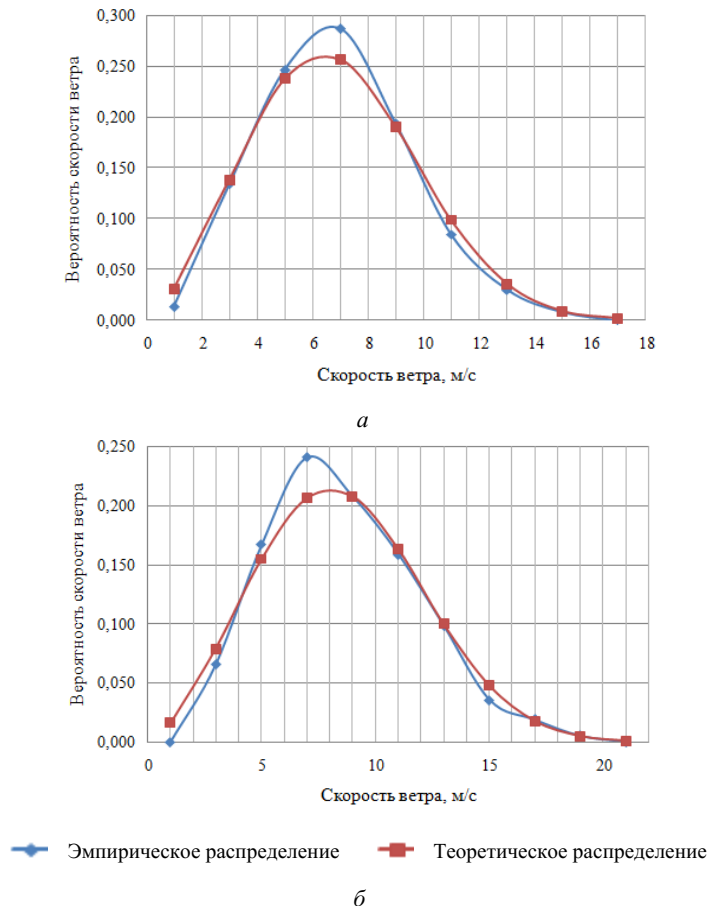


Рис. 2. Эмпирическое и теоретическое распределение для высоты 10 м (а) и 50 м (б)

В ходе работы были проанализированы типовые решения ведущих производителей ВЭУ: Vestas (Дания), Enercon (Германия), Bonus (Дания), DeWind (Германия). При помощи формулы (14) и рабочих характеристик ВЭУ был выполнен расчет среднегодовой производительности ВЭУ, результаты которого приведены в табл. 3. Из рассмотренных вариантов поставленным условиям лучше всего соответствует ветроэнергетическая установка DeWind D4 48/600.

Основные характеристики ВЭУ

Наименование	Vestas V44	Enercon E-40/6,44	Bonus B44/600	DeWind D4 48/600
Номинальная мощность, кВт	600	600	600	600
Начальная скорость, м/с	4,0	2,5	3,0	2,5
Номинальная скорость, м/с	16,0	12,0	15,0	11,5
Максимальная скорость, м/с	20,0	28,0	25,0	19,0
Диаметр ротора, м	44,0	43,7	44,0	48,0
Высота ступицы, м	53	50	50	55
Среднегодовая производительность, МВт·ч	2,32	2,47	2,29	2,72

Выводы

1. Удаленность Соловецких островов от материка и сложные климатические условия затрудняют доставку дизельного топлива и значительно увеличивают нагрузку на энергоисточники в зимний период. Первичная оценка ветроэнергетического потенциала Соловецких островов была проведена с помощью среднегодовой и среднемесячной скоростей ветра на различных высотах. Вычислены параметры функции распределения Вейбулла. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы показала, что распределение Вейбулла хорошо аппроксимирует результаты измерения скорости ветра в данной местности. Таким образом, используя функцию распределения вероятностей, можно анализировать и прогнозировать скорость ветра в будущем.

2. Выполнен анализ типовых решений ведущих производителей ВЭУ, определены среднегодовые производительности ВЭУ с использованием функции распределения Вейбулла и выбрана наиболее оптимальная установка.

Литература

1. Alves LM Monteiro, Costa A Lopes, da Graca Carvalho M. Analysis of potential for market penetration of renewable energy technologies in peripheral islands // Renewable Energy. 2000. №19. P. 311–317.
2. Chang TP. Estimation of wind energy potential using different probability density functions // Applied Energy. 2011. № 88. P. 1848–1856.
3. Cheng-Dar Yue, Chung-Sheng Chen, Yu-Chen Lee. Integration of optimal combinations of renewable energy sources into the energy supply of Wang-An Island // Renewable Energy. 2016. №86. P. 930–942.
4. 'Global map of wind, weather, and ocean conditions'. URL: <https://earth.nullschool.net>.
5. Hans Christian Gils, Sonja Simon. Carbon neutral archipelago – 100 % renewable energy supply for the Canary Islands // Applied Energy. 2017. №188. P. 342–355.
6. Hennessey JP. Some aspects of wind power statistics // J Appl Meteorol. 1977. №16. P. 119–128.
7. Jamil M, Parsa S, Majidi M. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density // Renewable Energy. 1995. №6(5). P. 623–628.
8. Justus C.G., Hargraves W.R., Mikhail A., Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions // J Appl Meteorol. 1978. №17(3). P. 350–353.
9. Jiahong Liu, Chao Mei, Hao Wang, Weiwei Shao, Chenyao Xiang. Mutual adaptability of renewable energy and water-supply systems in islands // Energy Procedia. 2017. №105. P. 799–804.
10. Marin C, Alves LM, Zervos A. 100 % RES-A challenge for island sustainable development. Instituto Superior Technico. Available at: <http://issuu.com/pubcipriano/docs/island100res/19>. 2005.

11. Ozay C., Celiktas M.S. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alacati region // *Energy Conversation and Management*. 2016. №121. P. 49–54.
12. Rocha PAC, Coelho de Sousa R, Freitas de Andrade C, Vieira da Silva ME. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil // *Applied Energy*. 2012. №89. P. 395–400.

References

1. Alves LM Monteiro, Costa A Lopes, da Graca Carvalho M. Analysis of potential for market penetration of renewable energy technologies in peripheral islands. *Renewable Energy*, 2000, no. 19, pp. 311–317.
2. Chang TP. Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, no. 88, 2011, pp. 1848–1856.
3. Cheng-Dar Yue, Chung-Sheng Chen, Yu-Chen Lee. Integration of optimal combinations of renewable energy sources into the energy supply of Wang-An Island. *Renewable Energy*, no. 86, 2016, pp. 930–942.
4. 'Global map of wind, weather, and ocean conditions'. Available at: <https://earth.nullschool.net>.
5. Hans Christian Gils, Sonja Simon. Carbon neutral archipelago – 100 % renewable energy supply for the Canary Islands. *Applied Energy*, no. 188, 2017, pp. 342–355.
6. Hennessey JP. Some aspects of wind power statistics. *J Appl Meteorol*, no. 16, 1977, pp. 119–128.
7. Jamil M, Parsa S, Majidi M. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. *Renewable Energy*, no. 6(5), 1995, pp. 623–628.
8. Justus C.G., Hargraves W.R., Mikhail A., Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *J Appl Meteorol*, no. 17(3), 1978, pp. 350–353.
9. Jiahong Liu, Chao Mei, Hao Wang, Weiwei Shao, Chenyao Xiang. Mutual adaptability of renewable energy and water-supply systems in islands, *Energy Procedia*. no. 105, 2017, pp. 799–804.
10. Marín C, Alves LM, Zervos A. 100% RES-A challenge for island sustainable development. *Instituto Superior Technico*. Available at: <http://issuu.com/pubcipriano/docs/island100res/19>. 2005.
11. Ozay C., Celiktas M.S. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alacati region. *Energy Conversation and Management*, no. 121, 2016, pp. 49–54.
12. Rocha PAC, Coelho de Sousa R, Freitas de Andrade C, Vieira da Silva ME. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, no. 89, 2012, pp. 395–400.

Для цитирования: Кангаш А.И., Костеневич А.С., Марьяндышев П.А., Любов В.К. Оценка ветроэнергетического потенциала Соловецкого архипелага и выбор оптимальной ветроэнергетической установки // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 9–17. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-1

For citation: Kangash A.I., Kostenevich A.S., Maryandyshev P.A., Lyubov V.K. Wind resource assessment of the solovetsky archipelago and selection of optimal wind turbine. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 9–17. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-1