

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-75-85

Создание офшорных ветроэлектростанций на Ладожском и Онежском озерах

А.О. Ниязов, Р.С. Цгоев

В связи с общемировым трендом на экологизацию и обновление генерирующих мощностей, в России реализуются программы поддержки развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Среди основных видов ВИЭ, согласно показателю установленной мощности, ветроэнергетика развивается особенно быстро. Повышенный интерес прикован к офшорным ветроэлектростанциям (ВЭС). В настоящее время в России нет подобных ВЭС, однако имеется большой потенциал для их реализации. Для оценки перспективности создания офшорной ветряной электростанции на определенной площадке необходим детальный анализ всех ее характеристик.

Выполнена оценка перспективности создания офшорных ВЭС на Ладожском и Онежском озерах. Учитывая схожесть географического положения и сравнимые площади водоемов, а также зарегистрированные средние многолетние скорости ветра (на Ладожском озере: север — о. Валаам (6,5 м/с), юг — острова Кареджи (6,7 м/с) и Сухо (6,9 м/с); на Онежском озере: на севере острова Василисин (МС «Маячный») $V = 6,4$ м/с, на юго-востоке островов Березовец, Еловец и Сосновец — 6,6 м/с), проведен расчет теоретического валового ветрового потенциала акваторий рассматриваемых озер. С учетом всех требований изучены возможные площадки под размещение офшорных ветроэлектростанций и определены наиболее подходящие для каждого озера. Для выбранных площадок оценен ветроэнергетический потенциал на высотах 10 и 100 м разработаны модели вертикального профиля ветра. Для площадки каждого озера по результатам ветроэнергетического расчета определены наиболее подходящие модели ветроэнергетических установок (ВЭУ). Установленные мощности ВЭС Ладожского и Онежского озер составляют 1684 и 856 МВт. Совместная выработка рассчитываемых ветроэлектростанций сможет покрыть 9,53% потребления северо-западной части России.

Ключевые слова: озёрно-офшорная ветроэлектростанция, ветропотенциал, площадка размещения, установленная мощность.

Для цитирования: Ниязов А.О., Цгоев Р.С. Создание офшорных ветроэлектростанций на Ладожском и Онежском озерах // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 75—85. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-75-85.

Development of Offshore Wind Power Plants on Lakes Ladoga and Onega

A.O. Niyazov, R.S. Tsgoev

In connection with the global trend towards greening and renewal of generating capacities, Russia is implementing programs to support the development of renewable energy sources (RES). Among the main types of RES, wind energy is developing especially rapidly in terms of installed capacity. Heightened interest is riveted to offshore wind farms (WPPs). Currently, there are no such wind farms in Russia, but there is great potential for implementing them. To assess the viability of developing an offshore wind farm at a particular site, a detailed analysis of all its characteristics is required. The article assesses the prospects for development of offshore wind farms on Lakes Ladoga and Onega. Taking into account the similarity of the geographical locations and comparable areas of these water bodies, as well as the recorded average long-term wind velocities (on Lake Ladoga northern part in the Valaam Island (6.5 m/s), in the lake southern part – the Karedzhi Island (6.7 m/s) and the Sukho Island (6.9 m/s); on Lake Onega on the Vasilisin Island northern part (the Mayachny MS) $V = 6.4$ m/s, and in the southeast in the Berezovets, Elovets and Sosnovets Islands (6.6 m/s), the theoretical gross wind potential of the water areas of these lakes was evaluated. Taking into account all requirements, possible sites for the placement of offshore wind farms were considered, and the most suitable ones for each lake have been determined. For the selected sites, the wind energy potential at heights of 10 and 100 m was estimated, and the vertical wind profile models were developed. Based on the wind energy evaluation results, the most suitable models of wind power plants (WPPs) have been determined for the sites of each lake. The installed capacities of the wind farms on Lakes Ladoga and Onega are estimated at 1684 and 856 MW, respectively. The combined output generated by the wind power plants evaluated in the analysis will be able to cover 9.53% of the consumption in the northwestern part of Russia.

Key words: lake-offshore wind power plant, wind potential, location site, installed capacity.

For citation: Niyazov A.O., Tsgoev R.S. Development of Offshore Wind Power Plants on Lakes Ladoga and Onega. Bulletin of MPEI. 2023;5:75—85. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-75-85.

Введение

В настоящее время идет активный этап экологизации промышленности, транспорта и энергетики. Этому предшествовала тенденция увеличения выбросов углекислого газа и опасных веществ в атмосферу. Для повышения темпов развития «зеленой» энергетики в России с 2014 по 2035 гг. реализуется программа поддержки возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Ветроэнергетика — наиболее быстро развивающаяся отрасль. На данный момент в мире введено в эксплуатацию множество ветроэлектростанций (ВЭС) общей суммарной мощностью 837 ГВт, и их число с каждым годом только растет. Так, в 2021 г. суммарная мощность введенных в строй ВЭС составила 93,6 ГВт [2].

Выбор площадки для размещения ветроэлектростанции, главным образом, основан на самой важной для ветроэнергетики характеристике — среднегодовой скорости ветра: чем она выше, тем выше эффективность ветроэлектрических установок (ВЭУ). Однако на суше не так часто встречаются места с хорошим ветропотенциалом. Кроме того, строительство ветроэлектростанций требует большой свободной территории, поэтому особый интерес прикован к офшорным ВЭС (электростанциям, построенным в водоеме на определенном удалении от побережья — в среднем, от 2 до 100 км). При современном уровне развития технологий строительство офшорных ветроэлектростанций сдерживает необходимость освоения глубоководных пространств. Максимальная глубина установки жестких фундаментов — 50 м. Возможно строительство ветропарков и в более глубоководных местах, но с увеличением глубины фундамент и все работы, связанные с его установкой, обойдутся значительно дороже. Поэтому различные проектные организации занимаются разработкой плавающих платформ для ВЭУ, используя опыт нефтедобывающей отрасли. Развитие офшорной ветроэнергетики в этом направлении позволит разместить ВЭС в глубоководных частях водоемов, более предпочтительных с технической и экономической точек зрения [3].

Цель настоящей работы — обоснование возможности размещения офшорных ветроэлектростанций на Ладожском и Онежском озерах. Для ее достижения требуется решить следующие задачи:

- оценить ветровые ресурсы данных озер;
- выделить приемлемые площадки под размещение офшорных ВЭС и выбрать наиболее перспективные из них;
- рассчитать валовый ветропотенциал на намеченных площадках;
- выбрать ВЭУ для проектируемых озерных ВЭС и изучить их технический ветропотенциал;
- проанализировать полученные результаты и сформировать вывод о целесообразности создания озерных ВЭС.

Информационные ресурсы

Существуют несколько специализированных баз данных (СБД) для оценки ветровых ресурсов Ладожского и Онежского озер: «Расписание погоды» («РП») [4], «Архив погоды с 1929 г.» [5], СБД «Nasa» [6]. Необходимо выполнить сравнительный анализ содержащихся в них соответствующих наблюдений. В СБД «Расписание погоды» и «Архив погоды с 1929 г.» хранятся данные, полученные от метеостанций (МС). Интервал измерений рассматриваемых баз данных (БД) — одинаковый. СБД «РП» предоставляет исходные наблюдения лишь с обработкой на грубые ошибки измерений (повторения и пропуски), а в СБД «Архив погоды с 1929 г.» суточные данные пересчитываются в среднее значение за сутки. В СБД «Nasa» для большинства областей приняты данные, полученные в ходе математического моделирования распределения ветровых ресурсов. Наиболее надежными источниками информации считаются МС, поскольку их измерения получены эмпирическим путем и, в большинстве случаев, в течение долгого промежутка времени, что важно для проектирования ВЭС.

Для Ладожского и Онежского озер (по критериям полноты ряда данных часовых измерений скорости ветра и малой удаленности от акваторий) выбраны семь и шесть метеостанций соответственно. Для выбранных МС по данным из рассматриваемых СБД проведена первичная обработка наблюдений, исключающая все повторения и пропуски. Благодаря лучшей полноте ряда данных и наибольшей точности измерения для районов рассматриваемых озер в качестве основной БД выбрана СБД «РП».

Первоочередная задача при выборе площадок под размещение озерных ВЭС — определение основных энергетических характеристик ветра для каждой из рассматриваемых МС за период наблюдения в 10 лет (оптимальное значение для проектирования ветроэлектростанций): среднемноголетней и максимальной скоростей ветра, коэффициента вариации скорости ветра, удельных мощности и энергии ветра, а также повторяемостей скоростей и направлений ветра. Опираясь на полученные данные, следует построить карты распределения среднемноголетней скорости ветра и удельной мощности по территориям Ладожского и Онежского озер. Основные энергетические характеристики ветра за период наблюдения 10 лет нельзя использовать для оценки общего уровня интенсивности ветра в любой точке рассматриваемого региона из-за высокого процента неточности, т. к. средние скорости зависят от рельефа, шероховатости поверхности, наличия затеняющих элементов и высоты над поверхностью земли. У разных МС эти условия могут довольно сильно отличаться. Для сопоставления среднемноголетних значений скорости ветра необходимо их приведение к сравнимым условиям (условиям открытой ровной местности) [7].

На площадках, выбранных МС, были определены и приведены к сравнимым условиям среднеголетние энергетические характеристики ветра (табл. 1). С помощью программы «Surfer15» построены карты с распределением приведенных к сравнимым условиям среднеголетней скорости ветра и ее удельной мощности на высоте 10 м по территории озер (рис. 1, 2).

По картам видно, что для Ладожского и Онежского озер среднеголетние скорости ветра меняются от 1,83 до 6,18 и от 1,88 до 3,76 м/с, соответственно, а удельные мощности ветрового потока — от 12,18 до 322,99 и от 16,13 до 77,88 Вт/м².

Площадки под размещение офшорных ВЭС на Ладожском и Онежском озерах выбраны с учетом достаточного ветроэнергетического потенциала, наличия свободной территории и ее кадастрового статуса, транспортной доступности площадок, возможности технического присоединения к ЛЭП от 110 кВ и выше, геологических условий, социальных ограничений, максимальной глубины водоема (не более 50 м) и удаления от берега (от 2 до 100 км).

Рельеф дна Ладожского озера — неравномерный. В северной части акватории находится большое количество островов и глубоководных впадин. Средняя глубина озера — 47 м. По направлению к югу рельеф дна постепенно становится более спокойным, глубины уменьшаются (средняя глубина в южной части — 13 м) [8]. Под размещение ВЭС по глубине и рельефу дна больше всего подходят южная, часть восточной, юго-восточная, юго-западная и часть западной акватории озера (рис. 3).

По условиям высокого ветропотенциала и возможности технического присоединения к ЛЭП 110 кВ и выше были определены три площадки, подходящие под размещение ветропарка на территории Ладожского озера (табл. 2, рис. 4). Они удовлетворяют условию максимальной глубины. Рельеф дна на всех площадках — однородный (важно для установки ВЭУ). Они также полностью удовлетворяют условию транспортной доступности (близости к основным гаваням, используемым как при транзитных перевозках грузов, так и при перевозке грузов в пределах озера). Транспортный путь проходит через порт Санкт-Петербурга, Ладожское озеро, Беломорско-Балтийский и Волго-Балтийский каналы, гавани Шлиссельбурга, Новой Ладоги и Свирицы. Выбранные площадки не мешают движению морских судов [8]. Благодаря анализу расположения природоохранных объектов на территории бассейна Ладожского озера выявлено, что рядом с площадками нет особо охраняемых зон [9, 10].

В качестве наиболее привлекательной площадки из всех предложенных под размещение ВЭС на Ладожском озере выбран первый вариант.

Рельеф дна Онежского озера — крайне неоднороден. В северной части водоема он характеризуется наличием подводных кражей и гряд, а также большим количеством островов и чередованием глубоководных впадин. Рельеф дна южной части характеризуется плавными очертаниями. Средняя глубина — 30 м. Максимальная глубина — 120 м (отмечена в северо-западной части). Средняя глубина в южной части —

Таблица 1

Приведенные к условиям открытой ровной местности средне-многолетние энергетические характеристики ветра на высоте 10 м на площадках МС

Номер метеостанции	Название метеостанции	Высота, м	V_0^{np} , м/с	$\dot{N}_{уд}^{np}$, кВт/м ²
Район Ладожского озера				
26072 (1)	Шлиссельбург	11	2,76	28,22
22917 (2)	Новая Ладога	9	3,34	49,99
22805 (3)	О. Валаам	9	6,18	322,99
22802 (4)	Сортавала	18	4,66	172,55
22891 (5)	Сосново	55	2,22	20,99
22912 (6)	Олонец	16	3,07	39,56
22913 (7)	Лодейное поле	14	1,83	12,18
Район Онежского озера				
22837 (1)	Вытегра	59	3,76	77,88
22727 (2)	Кондопога	40	3,60	77,42
22721 (3)	Медвежьегорск	80	2,70	38,96
22820 (4)	Петрозаводск	110	3,48	51,38
22831 (5)	Пудож	57	1,88	16,13
22929 (6)	Вознесенье	40	2,70	31,93

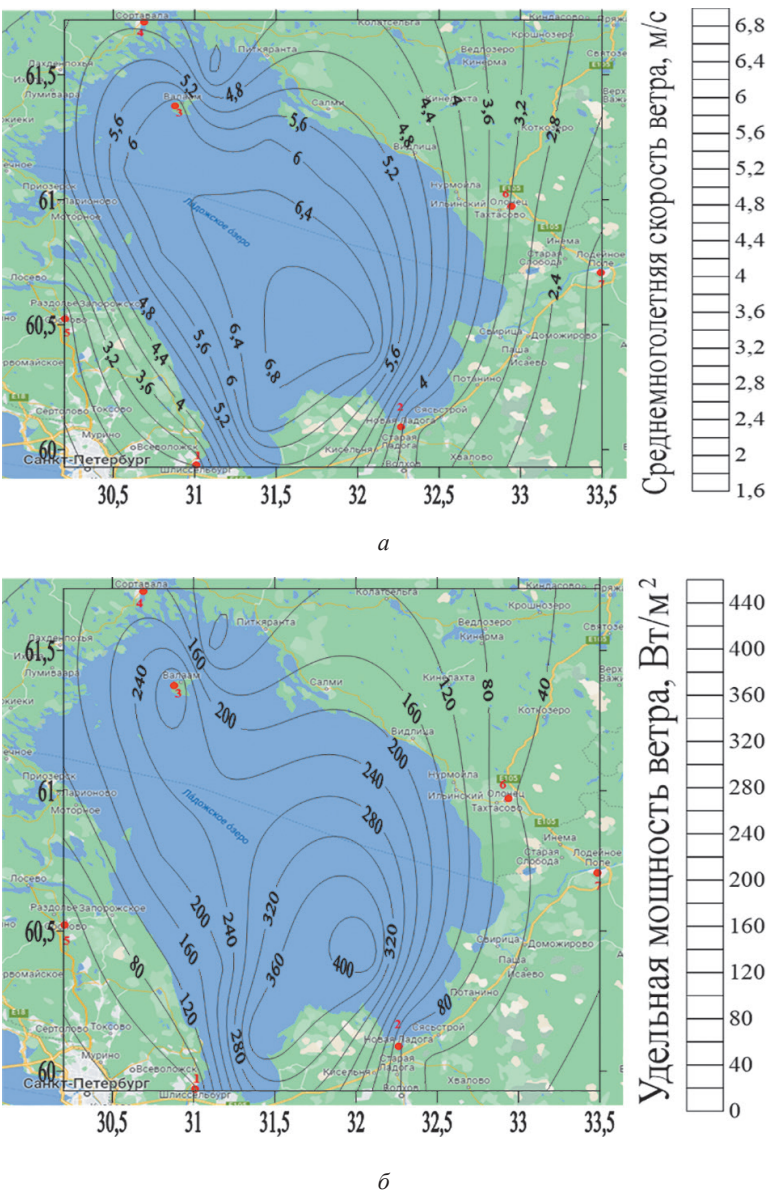


Рис. 1. Карты Ладожского озера с распределением среднегогодечной скорости (а) и удельной мощности (б) ветра

Таблица 2

Сопоставление вариантов площадок для размещения ВЭС

Вариант площадки	Близость к ОЭС	Близость к населенным пунктам	Площадь предлагаемой площадки, км²	Средняя скорость, м/с	Тип грунта
1	ПС «Запорожская» 110/35/10 кВ (16 км)	Приозерск (48 км), Шлиссельбург (84 км), Новая Ладога (95 км)	319,5	3,75	Песчаники, глина
2	ПС «Запорожская» 110/35/10 кВ (39 км)	Приозерск (88 км), Шлиссельбург (58 км), Новая Ладога (74 км)	358,7	3,75	
3	ПС «Полигон» 110/35/10 кВ (46 км)	Приозерск (112 км), Шлиссельбург (73 км), Новая Ладога (42 км)	314,9	3,75	

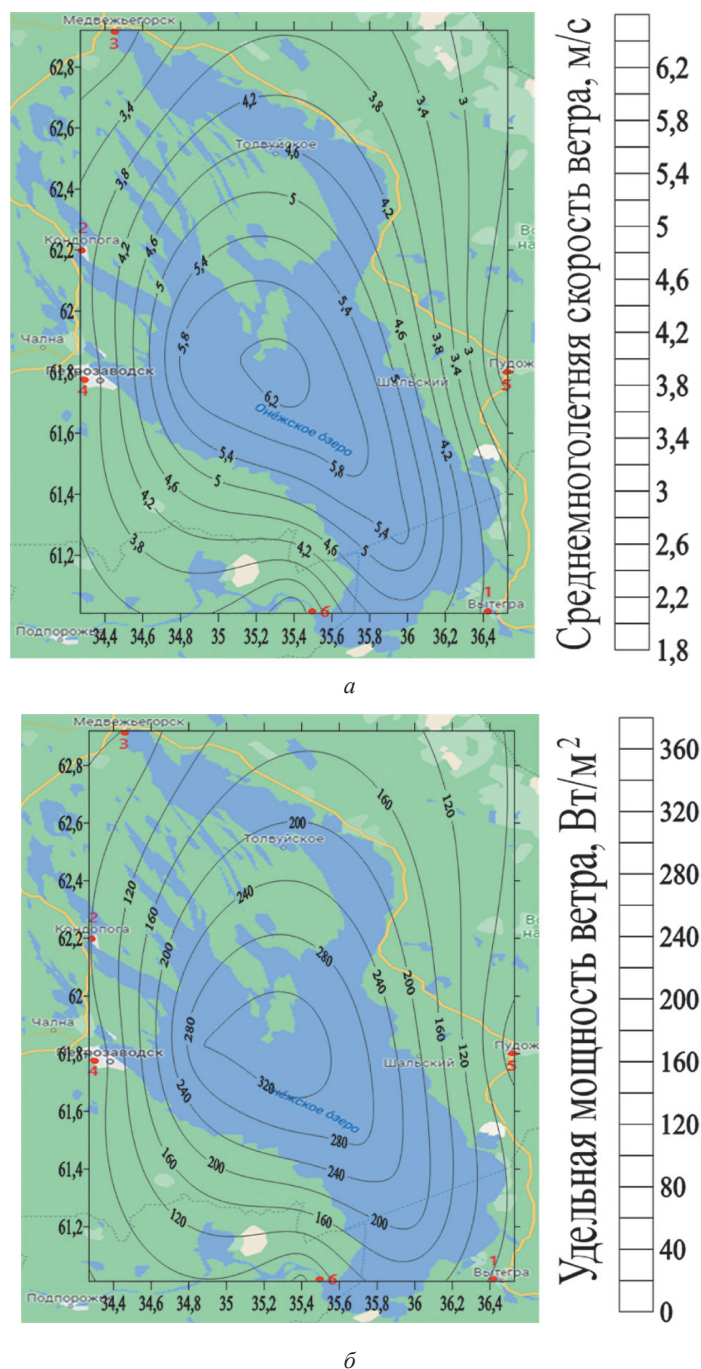


Рис. 2. Карты Онежского озера с распределением среднегогодежной скорости (а) и удельной мощности (б) ветра

20 м [11]. По критериям глубины и рельефа дна больше всего подходит под размещение офшорной ВЭС южная часть озера (рис. 5).

По условиям высокого ветропотенциала и возможности технического присоединения к ЛЭП 110 кВ и выше установлены четыре площадки, подходящие под размещение ветропарка на территории Онежского озера (табл. 3, рис. 6). Все они удовлетворяют условиям максимальной глубины, однородности рельефа дна и транспортной доступности. Основной транспортный путь проходит в южной части озера через гавани Воз-

несенья и Вытегры. Площадки не мешают судоходству [11]. Рядом с площадками нет особо охраняемых зон [9, 10].

Для дальнейшего анализа выбрана площадка под номером три, как наиболее привлекательная для размещения офшорной ВЭС на Онежском озере.

Данные во всех изученных БД представлены для высоты 10 м. Для проведения ветроэнергетических расчетов необходима информация о ветровых ресурсах на высоте башни предполагаемых ВЭУ (в большинстве случаев — от 80 до 130 м). Моделирование скорости

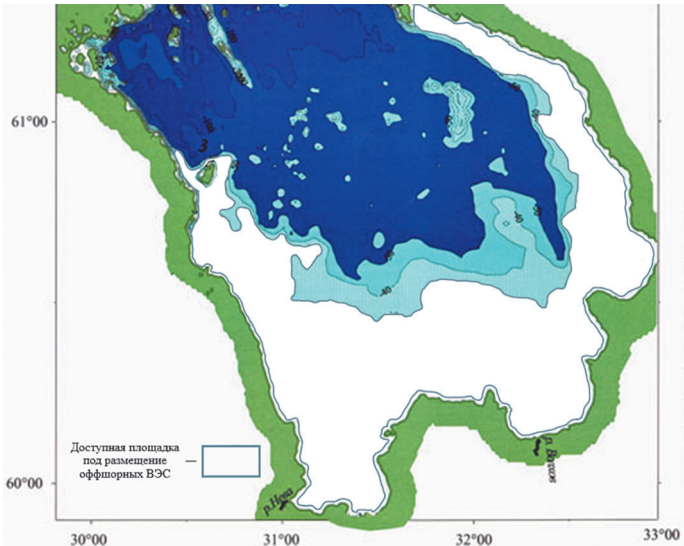


Рис. 3. Доступная по глубине и рельефу дна часть акватории Ладожского озера под размещение офшорных ВЭС



Рис. 4. Местоположение площадок ВЭС в Ладожском озере

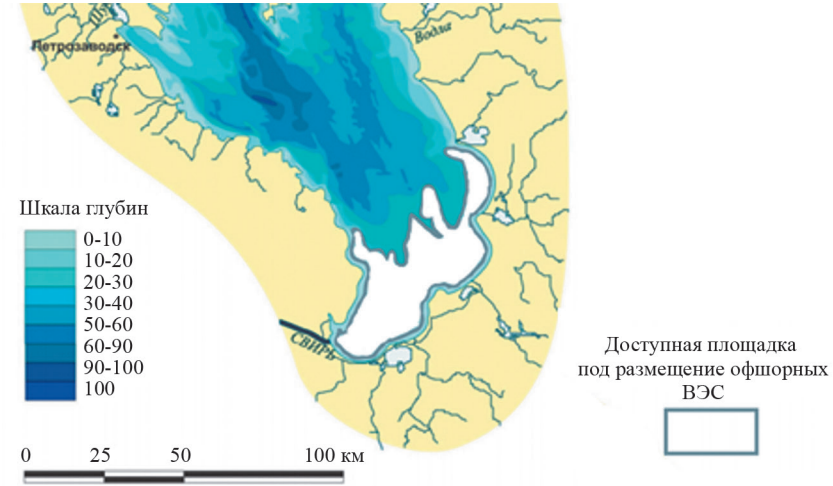


Рис. 5. Доступная по глубине и рельефу дна часть акватории Онежского озера под размещение офшорных ВЭС

Таблица 3

Сопоставление вариантов площадок ВЭС

Вариант площадки	Близость к ОЭС	Близость к населенным пунктам	Площадь предлагаемой площадки, км ²	Средняя скорость, м/с	Тип грунта
1	ПС «Вознесенье» 110/10 кВ (13 км), ПС «Ошта» 110/35/10 кВ (13,5 км)	Вознесенье (13 км), Вытегра (52 км)	57,50	3,05	Песчаники, глина
2	ПС «Мегра» 110/10 кВ (21,4 км)	Вознесенье (26 км), Вытегра (35 км)	214,8	3,15	
3	ПС «Устье» 110/10 кВ (13,5 км)	Вознесенье (47 км), Вытегра (27 км)	234,8	3,25	
4	ПС «Устье» 110/10 кВ (20,5 км)	Вознесенье (65 км), Вытегра (44 км)	85,60	2,95	



Рис. 6. Местоположение площадок ВЭС в Онежском озере

ветра по высоте выполнено по степенной зависимости вертикального профиля ветра (ВПВ) [12, 13]:

$$V_0^{h_2} = V_0^{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{m_0},$$

где $V_0^{h_1}$, $V_0^{h_2}$ — средние скорости ветра на высотах h_1 , h_2 от поверхности земли (водоема); m_0 — средний показатель степени, зависящий от различных факторов местности.

Модель ВПВ может быть получена по данным аэрологической метеостанции (АМС) и БД «Nasa». Основными критериями для выбора АМС считаются

наименьшая удаленность от площадки ВЭС и идентичность с ней рельефа местности.

Для площадки Ладожского озера по данным ближайшей АМС «Сортавала» (по методике кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ») разработана модель ВПВ — зависимость внутригодового изменения показателя степени от среднемесячной скорости ветра на 10 м: $m_l = 0,7594(V_l^{10})^{-0,734}$ (l — номер месяца), с коэффициентом детерминированности 0,9805.

Для площадки Онежского озера проектирование модели ВПВ проводили по сведениям БД «Nasa» (вследствие более низких погрешностей данных при сравнительном анализе с измерениями по ближайшей

АМС «Петрозаводск»). Она представлена в виде зависимости: $m_l = 0,4946(V_l^{10})^{-0,308}$, с коэффициентом детерминированности 0,8637.

Благодаря полученным зависимостям m и данным о ветровых ресурсах площадок на 10 м найдена корреляция скорости ветра от высоты на территориях проектируемых озерных ВЭС (табл. 4).

При выборе расчетных моделей ветроэнергетических установок для размещения на выбранных площадках озерных ВЭС следует учитывать единичную номинальную мощность ВЭУ с учетом возможности транспортировки и монтажа, класс безопасности ВЭУ и климатическое исполнение в соответствии с ИЕС61400-3 [14].

Для анализируемых озерных ВЭС предварительно выбраны офшорные модели ВЭУ с единичной мощностью от 3 до 6 МВт [15, 16]. Все производители ВЭУ находятся в Европе и Китае. Транспортировка оборудования возможна через Волго-Балтийский водный путь. Окончательный выбор расчетной модели ВЭУ происходит при сравнительном анализе максимальных показателей энергоэффективности (годовой выработки электроэнергии ветроустановками $\mathcal{E}_{\text{год}}$ и коэффициентов использования установленной мощности $k_{\text{ВЭУ,исп}}$) на рассматриваемых площадках ВЭС (табл. 5).

По критерию энергетической эффективности для обоих вариантов ВЭС больше всего подходит офшор-

ная модель ВЭУ типа V117/4000-4200 производства Vestas (Дания, ØВК — 117 м с высотой башни 84 или 91,5 м, допускает длительную эксплуатацию с мощностями 4,0 или 4.2 МВт) с мощностной характеристикой, изображенной на рис. 7. ВЭУ предназначена для использования в открытом море, характеризуется высокой производительностью, эффективностью и продолжительным сроком службы. Электродвигатель — асинхронный с короткозамкнутым ротором. Проблема реактивной мощности для его нормальной работы решается подключением к сети через полупроводниковый преобразователь частоты на запираемых ключах (транзисторах).

Для данной модели ВЭУ компания-производитель указывает два возможных стандартных значения высоты башни — 84 и 91,5 м, что следует учитывать при определении оптимальных параметров установки. С одной стороны, увеличение высоты башни ведет к дополнительным затратам на ее транспортировку и монтаж, с другой, — к возможному увеличению выработки. В данном случае вариант с высотой башни 84 м не подходит из-за класса безопасности (ИЕС ПА) [17], поскольку на площадках ВЭС Ладожского и Онежского озер могут быть размещены ВЭУ только I класса безопасности.

Рассчитаем выработку ВЭС. Энергию, вырабатываемую ВЭС, определим следующим образом:

Таблица 4

Зависимости скорости ветра от высоты на площадках озерных ВЭС

$h, \text{ м}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
На площадке ВЭС Ладожского озера													
$V^n, \text{ м/с}$	5,7	6,7	7,3	7,8	8,2	8,5	8,8	9,1	9,3	9,6	9,8	10,0	10,1
На площадке ВЭС Онежского озера													
$V^n, \text{ м/с}$	4,3	5,4	6,1	6,7	7,2	7,6	8,0	8,4	8,7	9,0	9,3	9,5	9,8

Таблица 5

Показатели энергетической эффективности моделей ВЭУ в ветровых условиях площадок озерных ВЭС

Производитель	Модель	$N, \text{ МВт}$	$H_0, \text{ м}$	$V_p^n, \text{ м/с}$	$k_{\text{ВЭУ,исп}}$	$\mathcal{E}_{\text{год}}, \text{ млн кВт}\cdot\text{ч}$
ВЭС Ладожского озера						
Sinovel	SL 3000/90	3,00	90,0	13,0	0,45	11,780
	SL 5000/128	5,00	100,0	12,5	0,47	20,618
	SL 6000/128	6,00	100,0	13,0	0,49	25,830
Vestas	V112 – 3.45	3,45	94,0	13,0	0,48	14,407
	V117/4000-4200	4,00	91,5	13,0	0,52	18,052
ВЭС Онежского озера						
Sinovel	SL 3000/90	3,00	90,0	13,0	0,39	10,346
	SL 5000/128	5,00	100,0	12,5	0,43	18,792
	SL 6000/128	6,00	100,0	13,0	0,45	23,811
Vestas	V112 – 3.45	3,45	94,0	13,0	0,43	13,143
	V117/4000-4200	4,00	91,5	13,0	0,47	16,574

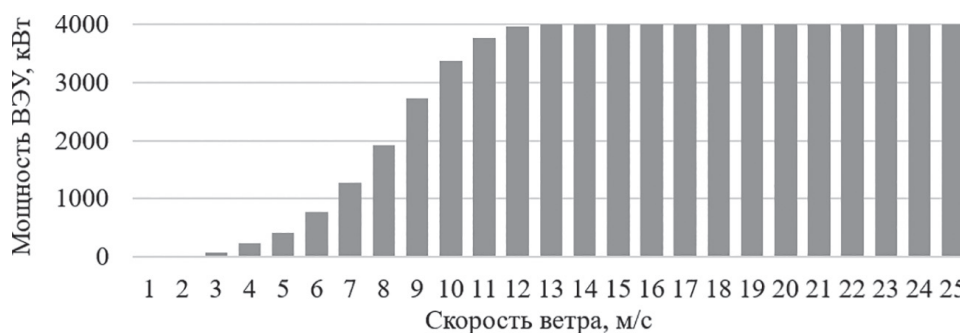


Рис. 7. Характеристика мощности ВЭУ типа V117/4000-4200

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭС}} = Z_{\text{ВЭУ}} K_p \beta_{\text{аз}} \beta_{\text{пр}} \mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$$

где $Z_{\text{ВЭУ}}$ — количество ветроустановок в составе ВЭС; K_p — коэффициент, учитывающий влияние фактической плотности воздуха на выработку ВЭУ; $\beta_{\text{аз}}$ — потери энергии ВЭС на взаимное влияние ветроустановок (аэродинамические потери на затенение); $\beta_{\text{пр}}$ — суммарные прочие потери (потери по технической готовности, электрические, климатические потери из-за обледенения и потери на гистерезис) [13]; $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ — выработка единичной ВЭУ.

При расчете выработки ВЭС примем допущение, что все ВЭУ, входящие в ее состав, работают в идентичных условиях и с одинаковой выработкой.

На площадке ВЭС Ладожского озера отсутствует преобладающее направление ветра. Доступны две схемы размещения (рядами и в шахматном порядке). Окончательно выбрана схема расположения в шахматном порядке, т. к. это позволит увеличить количество установок на 15% по сравнению со схемой размещения рядами. На доступной площади, равной 319,5 км², удастся расположить 421 ВЭУ суммарной установленной мощностью 1684 МВт. Энергия, вырабатываемая ВЭС за 1 год, с учетом всех потерь, составит 6351,881 млн кВт·ч, а КИУМ = 0,43.

На площадке ВЭС Онежского озера имеется преобладающее направление ветра. Выбрана схема размещения ВЭУ с оптимально уменьшенным расстоянием между установками. В результате такого выбора растут аэродинамические потери на затенение, но существенно повышается суммарная выработка электроэнергии ВЭС из-за увеличения числа ветроустановок. На выбранной площадке в 234,8 км² разместится ВЭС из 214 ВЭУ суммарной установленной мощностью 856 МВт. Энергия, вырабатываемая ВЭС за 1 год, с учетом всех потерь, составит 2943,219 млн кВт·ч, КИУМ = 0,39.

Таким образом, совместная годовая выработка двух озерных ВЭС составила 9295,1 млн кВт·ч. Рассмотрим оба варианта использования этой электроэнергии.

Первый вариант. В [18] указано, что «...в европейских странах до рекордных значений подскочили цены на электроэнергию, в отдельных странах Европы они достигали \$250 за МВт·ч...», тогда при экспорте цена

выработанной озёрными ВЭС электроэнергии будет равна 9295100 МВт·ч·250 \$/МВт·ч = 2323775000 \$.

Второй вариант. В [18] сказано, что «...в 2021 г. впервые за всю историю цены на газ превысили отметку 2000 долларов за 1000 куб. м...». Кроме того, в [19] приведено, что «...цена экспорта «Газпрома» в дальнее зарубежье в III квартале 2022 г. составила 2100 дол/(1000 куб. м)...». Определим, какой объём природного газа потребуется для выработки ТЭС указанной электроэнергии. При высоком КПД = 40% тепловой электростанции с циклом Ренкина для производства указанной электроэнергии озёрных ВЭС потребуется объём газа (по европейским стандартам удельная теплота сгорания природного газа — 39,5 МДж/м³), равный

$$[V \cdot 39,5 \text{ (МДж/м}^3\text{)} / 3,6 \text{ (МДж/кВт·ч)}] \cdot 0,4 = 9295,1 \text{ млн кВт·ч,}$$

$$\text{где } V = 2117870886 \text{ м}^3.$$

При продаже данного объёма газа по экспортной цене государство получит

$$2117870886 \text{ м}^3 \cdot 2100 \text{ $/(1000 м}^3\text{)} = 4447528861 \text{ $}.$$

Очевидно, что на сегодняшний день экспорт газа выгоднее почти в два раза, а средства от экспорта желательнее вкладывать в дальнейшее развитие ветроэнергетики. Эта тенденция — довольно лёгкий путь сделать возобновляемую энергетику окупаемой, если придерживаться следующей стратегии: все ресурсы возобновляемой энергетики (солнечных, ветровых электростанций и др.) направлять на выработку электроэнергии для покрытия графика внутренних нагрузок электроэнергетической системы страны, а высвободившиеся объёмы природного газа пустить на экспорт.

По опубликованным данным по Кармалиновской, Кочубеевской, Берестовской, Новолаской ВЭС и др. на сооружение 1 кВт установленной мощности наземной ВЭУ капитальные затраты от проекта до запуска установки составляют усреднённо 120000 руб./кВт (или 1905 \$/кВт по курсу \$1 ≈ Р63). На офшорных ВЭС на Ладожском и Онежском озёрах предложено применение 635 ВЭУ общей установленной мощностью 2540 МВт. При этом (принимая по отношению к наземным ВЭС для офшорной ВЭС коэффициент удорожа-

ния 1,5), суммарные капитальные затраты на сооружение ВЭС на обоих озёрах будут равны

$$(2540000 \text{ кВт} \cdot 1905 \text{ \$}/\text{кВт})1,5 = \\ = (4838700000 \text{ \$})1,5 = 7258050000 \text{ \$}.$$

Таким образом, при упрощённой предварительной оценке офшорные ВЭС на Ладожском и Онежском озёрах окупятся за $(7258050000 \text{ \$}/4447528861 \text{ \$} \approx 1,63) 1,5 \dots 2,0$ года эксплуатации.

Заключение

Рассмотрены перспективы создания офшорных ВЭС на Ладожском и Онежском озёрах. Выбраны доступные площадки на акваториях озёр по следующим требованиям: максимально доступная глубина, оптимальный рельеф дна, наибольший ветровой потенциал, дополнительные технические и социальные требования. Рассчитан валовый ветропотенциал анализируемых площадок, по его уровню сделан выбор ВЭУ для озерных ВЭС.

Для Ладожского озера взята площадка в 319,5 км² под размещение ВЭС. При условиях минимизации потерь и максимизации выработки возможно размещение 421 ВЭУ (V117/4000-4200) суммарной установленной мощностью 1684 МВт. Энергия, вырабатываемая ве-

троэлектростанцией за 1 год, — 6351,881 млн кВт·ч. Озерная ВЭС располагается на территории Ленинградской области, потребление электроэнергии которой (включая г. Санкт-Петербург) — 49195,2 млн кВт·ч [20]. Офшорная ВЭС Ладожского озера сможет покрыть 12,91% электрических потребностей данного региона.

Под строительство ВЭС для Онежского озера выбрана площадка (234,8 км²), на которой возможно расположить 214 ВЭУ модели V117/4000-4200 суммарной установленной мощностью 856 МВт. Энергия, вырабатываемая ветроэлектростанцией за 1 год, — 2943,219 млн кВт·ч. Озерная ВЭС Онежского озера сможет покрыть 5,98% потребностей в электроэнергии Ленинградской области (включая г. Санкт-Петербург).

Суммарное потребление электроэнергии в объединённой энергосистеме Северо-Западной части России составляет 97551,2 млн кВт·ч [20]. Совместная выработка проектируемых озерных ВЭС (9295,1 млн кВт·ч) покроет 9,53% потребления данного региона.

Анализ полученных теоретических и расчётных данных показателей энергоэффективности проанализированных озерных ВЭС и сложившегося конъюнктурного положения в Европе показал целесообразность сооружения офшорных ВЭС на Ладожском и Онежском озёрах.

Литература

1. **Министерство** энергетики РФ [Электрон. ресурс] www.minenergo.gov.ru/node/489/ (дата обращения 12.08.2022).
2. **Global Wind Rep.** 2022 [Электрон. ресурс] www.gwec.net/global-wind-report-2022/ (дата обращения 13.08.2022).
3. **Давыдов Д.Ю., Обухов С.Г.** Модель оценки технико-экономических показателей офшорных ветроэлектростанций // Известия высших учебных заведений. Серия «Проблемы энергетики». 2021. Т. 23. № 5. С. 115—130.
4. **Метеорологический** сайт «Расписание Погоды» [Официальный сайт] www.rp5.ru/ (дата обращения 15.08.2022).
5. **Метеорологический** сайт «Архив погоды с 1929 г.» [Официальный сайт] www.pogoda-service.ru/ (дата обращения 15.08.2022).
6. **Метеорологический** сайт «Nasa» [Официальный сайт] power.larc.nasa.gov/ (дата обращения 15.08.2022).
7. **Мин М.Т.** Расчет ресурсов ветровой энергетики республики Мьянма для обеспечения автономных систем обеспечения полетов // Инновации и инвестиции. 2018. № 3. С. 201—207.
8. **Ладожское озеро и достопримечательности его побережья.** Атлас / под ред. Румянцев В.А. СПб.: Нестор — История, 2015. С. 15—18; 35—36.
9. **Публичная** кадастровая карта [Электрон. ресурс] pkk.rosreestr.ru/ (дата обращения 23.08.2022).

References

1. **Ministerstvo** Energetiki RF [Elektron. Resurs] www.minenergo.gov.ru/node/489/ (Data Obrashcheniya 12.08.2022). (in Russian).
2. **Global Wind Rep.** 2022 [Elektron. Resurs] www.gwec.net/global-wind-report-2022/ (Data Obrashcheniya 13.08.2022).
3. **Davydov D.Yu., Obukhov S.G.** Model' Otsenki Tekhniko-ekonomicheskikh Pokazateley Offshornykh Vetroelektrostantsiy. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Problemy Energetiki». 2021;23;5: 115—130. (in Russian).
4. **Meteorologicheskii** Sayt «Raspisanie Pogody» [Ofits. Sayt] www.rp5.ru/ (Data Obrashcheniya 15.08.2022). (in Russian).
5. **Meteorologicheskii** Sayt «Arkhib Pogody s 1929 g.» [Ofits. Sayt] www.pogoda-service.ru/ (Data Obrashcheniya 15.08.2022). (in Russian).
6. **Meteorologicheskii** Sayt «Nasa» [Ofits. Sayt] power.larc.nasa.gov/ (Data Obrashcheniya 15.08.2022).
7. **Min M.T.** Raschet Resursov Vetrovoy Energetiki Respubliki M'yanma dlya Obespecheniya Avtonomnykh Sistem Obespecheniya Poletov. Innovatsii i Investitsii. 2018;3:201—207. (in Russian).
8. **Ladozhskoe** Ozero i Dostoprimechatel'nosti Ego Poberezh'ya. Atlas. Pod Red. Rumyantseva V.A. SPb.: Nestor — Istoriya, 2015:15—18; 35—36. (in Russian).
9. **Publichnaya** Kadastrovaya Karta [Elektron. Resurs] pkk.rosreestr.ru/ (Data Obrashcheniya 23.08.2022). (in Russian).

10. ООПТ России [Электрон. ресурс] <http://www.oopt.aari.ru/> (дата обращения 23.08.2022).
11. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Филатов Н.Н. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 15, 24.
12. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В. Ветроэнергетика. М.: Изд-во МЭИ, 2016.
13. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
14. IEC 61400-3-1:2019. Wind Energy Generation Systems Pt. 3–1. Design Requirements for Fixed Offshore Wind Turbines.
15. Wind Turbines [Электрон. ресурс] www.wind-turbine.com/ (дата обращения 03.09.2022).
16. The Wind Power [Электрон. ресурс] www.the-windpower.net/ (дата обращения 11.01.2023).
17. Vestas. Технические характеристики. Регулирование мощности. Эксплуатационные данные [Электрон. ресурс] www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V117-4-2-MW (дата обращения 11.01.2023).
18. Информационный бюллетень за июль 2022 года «Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития» [Электрон. ресурс] https://novawind.ru/bitrix/images/Byulleten_Interaktivny_2022_1.pdf (дата обращения 15.10.2022).
19. Стоимость экспорта «Газпрома» в дальнее зарубежье выросла в 3,5 раза [Электрон. ресурс] <https://www.gazeta.ru/business/news/2022/09/27/18665689.shtml> (дата обращения 15.10.2022).
20. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 г. [Электрон. ресурс] https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (дата обращения 15.10.2022).
10. ООПТ Rossii [Elektron. Resurs] <http://www.oopt.aari.ru/> (Data Obrashcheniya 23.08.2022). (in Russian).
11. Oнежskoe Ozero. Atlas. Otв. red. Filatov N.N. Petrozavodsk: Karel'skiy Nauchnyy Tsentр RAN, 2010:15, 24. (in Russian).
12. Vas'kov A.G., Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V. Vetroenergetika. M.: Izd-vo MEI, 2016. (in Russian).
13. Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V., Shestopalova T.A. Osnovnye Kharakteristiki Vetra. Resursy Vetra i Metody Ikh Rascheta. M.: Izd-vo MEI, 2012. (in Russian).
14. IEC 61400-3-1:2019. Wind Energy Generation Systems Pt. 3–1. Design Requirements for Fixed Offshore Wind Turbines.
15. Wind Turbines [Elektron. Resurs] www.wind-turbine.com/ (Data Obrashcheniya 03.09.2022).
16. The Wind Power [Elektron. Resurs] www.the-windpower.net/ (Data Obrashcheniya 11.01.2023).
17. Vestas. Tekhnicheskie Kharakteristiki. Regulirovanie Moshchnosti. Ekspluatatsionnye Dannye [Elektron. Resurs] www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V117-4-2-MW (Data Obrashcheniya 11.01.2023).
18. Informatsionnyy Byulleten' za Iyul' 2022 Goda «Rynok Vozobnovlyaemoy Energetiki Rossii: Tekushchiy Status i Perspektivy Razvitiya» [Elektron. Resurs] https://novawind.ru/bitrix/images/Byulleten_Interaktivny_2022_1.pdf (Data Obrashcheniya 15.10.2022). (in Russian).
19. Stoimost' Eksporta «Gazproma» v Dal'nee Zaru-bezh'e Vyroslo v 3,5 Raza [Elektron. Resurs] <https://www.gazeta.ru/business/news/2022/09/27/18665689.shtml> (Data Obrashcheniya 15.10.2022). (in Russian).
20. Otchet o Funktsionirovaniі EES Rossii v 2021 g. [Elektron. Resurs] https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (Data Obrashcheniya 15.10.2022). (in Russian).

Сведения об авторах:

Ниязов Артур Олимович — магистрант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: niazovao@mpei.ru

Цгоев Руслан Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: TsgoyevRS@mpei.ru

Information about authors:

Niyazov Artur O. — Master's Student of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: niazovao@mpei.ru

Tsgoev Ruslan S. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: TsgoyevRS@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 30.12.2022

The article received to the editor: 30.12.2022

Статья принята к публикации: 06.06.2023

The article has been accepted for publication: 06.06.2023