



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Оценка ветроэнергетического потенциала территории
Санкт-Петербурга»

Исполнитель Запорожец Антон Владиславович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)
доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)
Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

« 29 » мая 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Введение

Проблема энергосбережения и электрообеспечения сегодня стоит довольно остро, так как промышленность и технологии постоянно развиваются, требуя для своего функционирования огромные энергетические ресурсы. Также, происходит постоянный рост численности населения. Как следствие, данные явления приводят к необходимости существенного увеличения расходов электроэнергии. Основной проблемой, касающейся этого вопроса, является то, что основными источниками энергии в современном мире, по-прежнему являются такие традиционные виды: нефть, уголь и газ. Их использование влечёт за собой ряд таких довольно серьёзных проблем и недостатков как рост выбросов углекислого газа, увеличение ростов истощаемости сырья, многократное нанесение широкомасштабного ущерба окружающей среде. Для решения большинства этих проблем имеет смысл рассматривать увеличение объёма использования альтернативных источников электроэнергии. Одним из таких источников является ветер. Использование энергии, вырабатываемой ветром, может существенно улучшить качество жизни во всём мире.

Целью данной работы является оценка ресурсного потенциала ветроэнергетики Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

- Изучить литературные источники по исследуемой теме;
- Рассчитать скорости ветра на высотах до 2 км по сезонам и в среднем за годовой период;
- Рассчитать периоды простоя ВЭУ на основе вычисления повторяемости скорости ветра <4 и >25 м/с;
- Рассчитать и проанализировать преобладающие направлений ветра на высоте флюгера и на оптимальных высотах;

- Выявить оптимальные для установки ВЭУ места по карте высот с помощью геоинформационной системы QGIS.

Оценка и анализ произведены на основе материалов аэрологических зондирований атмосферы, выполняемых на базе станции Воейково (Ленинградская область) на всём протяжении 2021-го года.

На сайте университета Вайоминга были получены данные:

- 1) 80-ти зондирований за 4 годовых сезона;
- 2) 1022-х измерений на различных высотах;
- 3) По ночным и дневным срокам.

Статистический анализ данных был выполнен с помощью программы Excel, пространственный анализ с помощью геоинформационной системы QGIS.

Выпускная квалификационная работа состоит из двух глав, 4 таблиц и 31 рисунка.

В первой главе описываются особенности традиционных и альтернативных источников энергии, ветроэнергетика в различных странах, а также в Российской Федерации, виды ветроэнергетических установок, их технические характеристики и ветровой режим Ленинградской области.

Во второй главе представлены данные по классификации скоростей ветра, проведен расчёт и оценка сезонной повторяемости скоростей и направлений ветра на различных высотах, смоделирован вертикальный профиль скорости, построены розы ветров по стационарным и высотным данным по ветру, а также выполнен подбор оптимальных высот с преобладанием номинальных скоростей ветра.

В третьей главе был выполнен пространственный анализ территорий, рассчитаны высотные и экспозиционные данные по некоторым районам Ленинградской области, произведён выбор конкретной модели ветроэнергетической установки, рассчитана её электроэнергетическая выработка без учёта и с учётом оптимальных высот.

Ветроэнергетика

1.1 Возобновляемые и невозобновляемые источники энергии

Возобновляемые источники энергии генерируются из природных ресурсов, «запас» которых может быть возобновлён в течение относительно короткого периода времени. К возобновляемым источникам относят солнечный, ветровой, гидроэнергетический, геотермальный и биомассовый виды энергии [1]

Преимущества возобновляемых энергоресурсов:

- Поскольку возобновляемые источники энергии не сжигаются как большинство видов ископаемого топлива, они не способствуют выделению загрязняющих веществ в атмосферу и обеспечивают сохранение чистоты окружающей среды;
- Различные виды источников возобновляемой энергии встречаются во всем мире и не могут быть исчерпаны;
- Поскольку для обслуживания, установки и эксплуатации оборудования, используемого в данной сфере, необходимы обученные технические специалисты, а некоторые станции, использующие возобновляемые источники энергии, могут создавать больше рабочих мест, чем высокомеханизированные заводы на ископаемом топливе;
- Выбросы парниковых газов, связанные с возобновляемыми источниками энергии, практически отсутствуют.

Недостатки возобновляемых энергоресурсов:

- Стоимость 1 кВт/ч энергии, производимого ветродвигателем, существенно выше стоимости энергии, получаемой за счет сжигания жидкого топлива и энергии атомных электростанций[2];
- Такие возобновляемые источники энергии как солнце и ветер требуют больших земельных площадей для производства энергии по выработке конкурентоспособной с традиционными источниками;

- На возобновляемые источники энергии также влияют погодные условия, значительно снижающие постоянство их использования и усложняющие расчёт потенциальной выработки электроэнергии. Например, ветроэнергетические установки вырабатывают электроэнергию только там, где ветер определённой скорости проявляет достаточную временную активность, а солнечные панели не работают в ночное время и менее эффективны в пасмурные дни.

Невозобновляемые источники энергии производятся из ресурсов, запасы которых не способны восстанавливаться или делают это в результате очень медленных по времени протекания природных процессов. Основными невозобновляемыми источниками энергии в мире являются такие ископаемые виды топлива как: уголь, газ и нефть. Ядерная энергия также считается невозобновляемой, поскольку в земной коре имеется ограниченный запас урана. При планировании электроэнергетической программы для различных потребителей необходимо учитывать преимущества и недостатки возобновляемых и невозобновляемых источников энергии.

Преимущества невозобновляемых энергоресурсов:

- Поскольку ископаемые виды топлива являются традиционными источниками энергии в мире, электростанции, логистика, теплевоэнергетическая инфраструктура и различные промышленные предприятия построены на базе их использования, представляя собой огромный отлаженный механизм, предоставляющий сотни тысяч рабочих мест;
- Многие невозобновляемые источники энергии более надежны, чем большинство возобновляемых источников, так как их использование не подвержено различным погодным условиям и факторам;
- Они обеспечивают непрерывную, независящую от погоды энергию;

- Благодаря появлению таких технологий, как CCS (Улавливание и хранение углерода) появилась возможность использовать ископаемое топливо с уменьшением вредного воздействия на окружающую среду.

Недостатки невозобновляемых энергоресурсов:

- Ископаемые виды топлива находятся в ограниченном количестве и однажды будут исчерпаны;
- Процессы добычи и транспортировки ископаемого топлива не единожды наносили широкомасштабный ущерб окружающей среде, например, в результате аварийных разливов нефти. Вероятность повторения подобных событий остаётся весьма высокой и в современном мире;
- Сжигание ископаемого топлива сопровождается выбросом вредных парниковых газов в атмосферу, в первую очередь, CO_2 .
- Широкомасштабное внедрение таких технологий как вышеупомянутое CCS является чрезвычайно дорогостоящим.
- Атомные электростанции не выделяют CO_2 , но создают риски потенциальной утечки радиации, некоторые из которых образуются в результате хранения сопутствующих отходов. Затраты на строительство новых атомных электростанций за последние 10 лет резко возросли, что делает использование атомной электроэнергии менее экономичным, чем использование других источников энергии.

1.2 Ветроэнергетика в мире и России

а) Ветроэнергетика в мире

Положение ветроэнергетики в современном мире демонстрирует карта, представленная на рисунке 1.

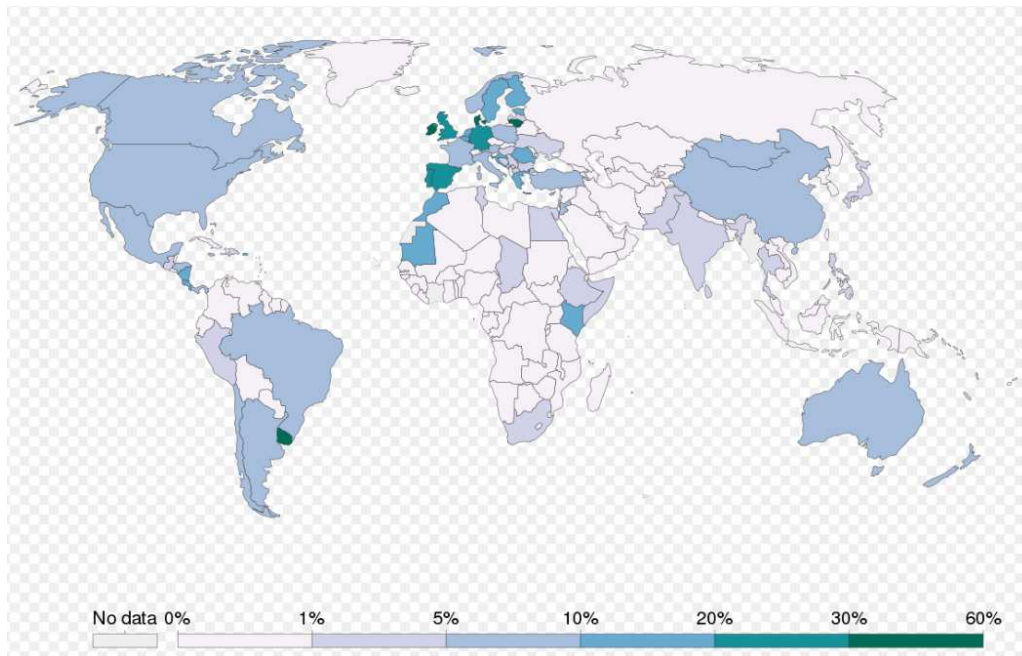


Рисунок 1. Карта процентного соотношения доли ветроэнергетики в общем объеме от сектора энергообеспечения по странам за 2020г

Страны-лидеры по доле ветроэнергетики в %: 1) 56% в Дании; 2) 40% в Уругвае; 3) 36% в Литве; 4) 35% в Ирландии; 5) % в Португалии; 6) 24% в Великобритании; 7) 23% в Германии; 8) 20% в Испании; 9) 18% в Греции; 10) 16% в Швеции; 11) 15% в ЕС; 12) 8% в США; 13) 6% в Китае.

Безусловное лидерство в установке новых ВЭУ продолжает демонстрировать Китай, которым в 2020 году введено в эксплуатацию рекордные 52,0 тыс. МВт (из них 48,9 тыс. МВт на суше). На втором месте следует США (16,2 тыс. МВт), далее — Бразилия (2,3 тыс. МВт), Нидерланды (2,0 тыс. МВт) и Германия (1,6 тыс. МВт). Пятерка лидеров обеспечила 80,6% от всех новых ветроэнергетических мощностей мира, построенных в 2020 году[3].

Пятёрка крупнейших рынков по суммарной установленной мощности на конец 2020 г выглядит следующим образом: Китай, США, Германия, Индия и

Испания. На эти государства в совокупности приходится 73% всех ветроэнергетических мощностей в мире. Всего в мире установлено почти 773,0 тыс. МВт (95,5% из них на суше). В Китае показатель достиг 278,0 тыс. МВт, в США — 122 тыс. МВт.

На рисунке 2 представлена доля производителей ВЭУ, установленных в мире, в 2020 г.

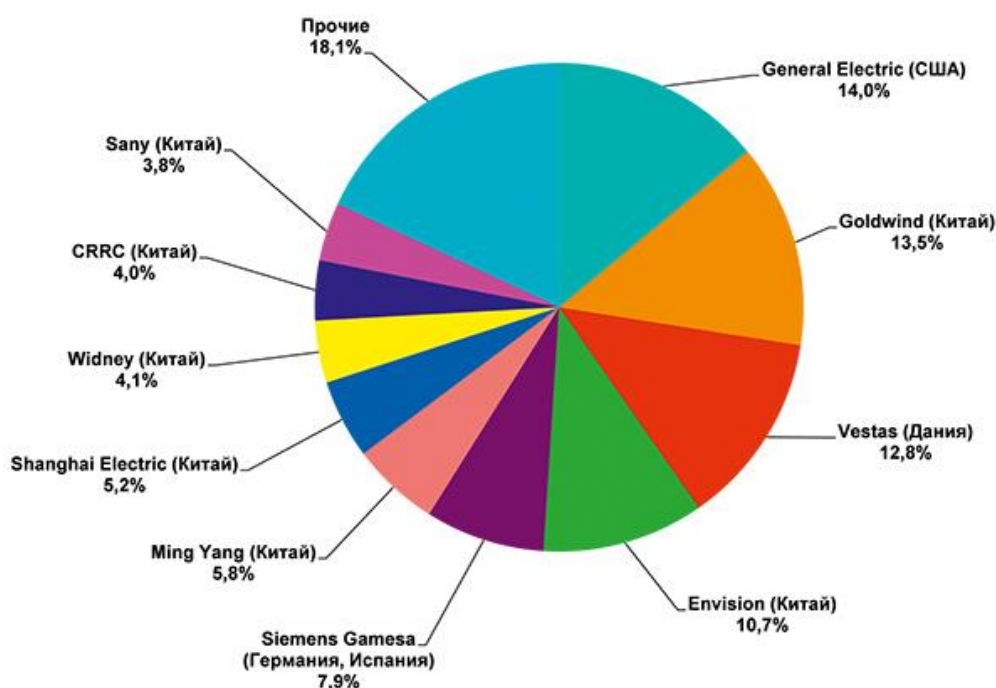


Рисунок 2. Доля производителей ВЭУ, установленных в мире в 2020 г, с названиями компаний и странам, в которых они базируются

Таким образом, в современном мире доля производства ВЭУ Китайскими ветроэнергетическими компаниями составляет 47 %, составляя практически половину от мирового рынка.

В таблице 1.2 представлен ранжированный список стран по объемам выбросов углекислого газа, а также представлен потенциал ветроэнергетики данных стран.

№	Страна	Выбросы CO ₂ , млн т	Потенциал ветроэнергетики, ТВт/ч		
			Суша	Море	Всего
1	Китай	8547.7	39000	4600	44000
2	США	5270.4	74000	14000	89000
3	Индия	1830.9	2900	1100	4000
4	Россия	1781.7	120000	23000	140000
5	Япония	1259.1	570	2700	3200
6	Германия	788.3	3200	940	4100
7	Южная Корея	657.1	130	990	1100
8	Иран	603.6	5600	-	5600
9	Саудовская Аравия	582.7	3000	-	3000
10	Канада	499.1	78000	21000	99000

Таблица 1.2 Лидирующие по выбросам CO₂ страны и их ветроэнергетический потенциал в ТВт/ч

Анализируя данные из приведённой выше таблицы, можно наблюдать что такие страны-лидеры по выбросам CO₂ как Китай, США, Германия также находятся в списке стран с довольно большим процентом использования ветроэнергетики в общем энергетическом секторе, а такие компании-производители ВЭУ как Sany (Китай), CRRC (Китай), Widney (Китай), Shanghai Electric (Китай), Ming Yang (Китай), Envision (Китай), Goldwind (Китай), Siemens Gamesa (Германия), General Electric (США) функционируют непосредственно на их территории, что может говорить о политике развития ветровой электроэнергетики этих стран и, как следствие, возможном сокращении выбросов углекислого газа.

б) Ветроэнергетика в России

Благодаря своей огромной площади, Россия имеет значительные перспективы по использованию энергии ветра, обладая самым большим потенциалом ветроэнергетики среди стран-лидеров по выбросам CO_2 и в целом в мире. По расчетам экспертов, технический потенциал ветроэнергетики России - 1000 ГВт - в десять раз превышает то количество электроэнергии, которую сегодня вырабатывает вся энергосистема страны[4]. Несмотря на это, в настоящее время, РФ не входит даже в первые 6 десятков стран-производителей ветроэнергии. Доля ветроэнергетики в производстве электроэнергии на 2021-ый год составила всего 0,32%.

Сейчас самые крупные ветряные парки в России находятся в Калининградской области, Чукотском А.О. и в Республике Калмыкия.

Это далеко не все перспективные зоны для реализации ветряных установок, также большим потенциалом обладают Ленинградская, Мурманская, Ростовская, Архангельская, Пензенская, Ульяновская, Нижегородская области, Ямало-Ненецкий АО, Краснодарский и Красноярский края. По приблизительным расчётам, установкой на территории Финского залива в прибрежной зоне Ленинградской области 1849 ВЭУ модели Vestas V164-8.0 можно воспроизвести объём электроэнергии, вырабатываемой на Ленинградской атомной электростанции[10].

Согласно мнению экспертов, потенциал ветроэнергетики в РФ совершенно не реализован. Тому имеется множество причин, но главная из них — это значительные материальные затраты на создание ветряных парков, которые зачастую делают стоимость энергии альтернативных источников равной традиционной — именно этот фактор тормозит развитие ветроэнергетики в России. На данный момент, инвесторов, готовых вложить свои денежные средства в рассматриваемую область, недостаточно. А более чем в половине всех стран мира, ветроэнергетика используется и разрабатывается именно на коммерческой основе.

1.3 Анализ устройства ВЭУ и область их использования

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенных для преобразования энергии ветра в другие виды энергии[5].

Существуют два основных типа ветрогенераторов, конструктивные отличия которых состоят в расположении оси вращения элемента, принимающего энергию ветра. Ветряные генераторы бывают:

- С горизонтальным типом вращения оси
- С вертикальным типом вращения оси

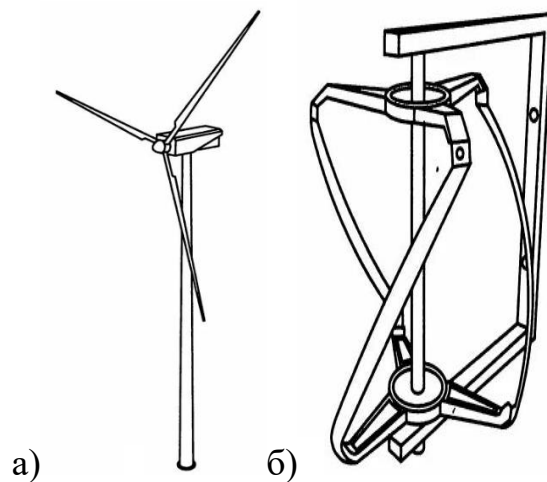


Рисунок 3. Внешний вид ветроустановки с горизонтальной осью вращения (а) и с вертикальной осью (б)

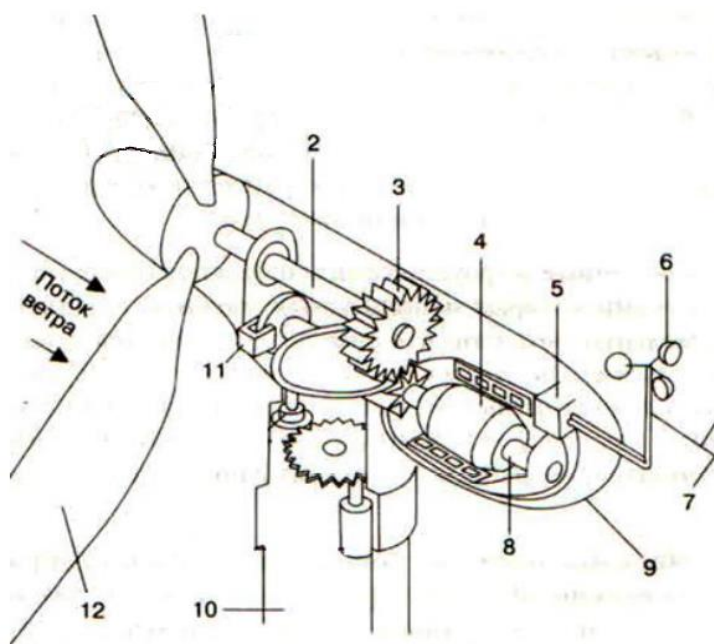


Рисунок 4. Конструктивная схема ВЭУ

На рисунке 2 представлены основные конструктивные узлы ветроэнергетической установки, описывающие её устройство. На данной схеме используются следующие позиционные обозначения:

- 1) Ротор ветроколеса, преобразующий воздействие ветра в механическую энергию.
- 2) Низкоскоростной вал, приводимый в движение ротором ветроколеса и задействованный в передаче механической энергии.
- 3) Редуктор, используемый для повышения частоты вращения ветроколеса (ротора).
- 4) Генератор, вырабатывающий электроэнергию и имеющий в своем составе высокоскоростной вал.
- 5) Контроллер, отвечающий за управление всей установки. С его помощью запуск и остановка ВЭУ может производиться в автоматическом режиме.
- 6) Анемометр: прибор, предназначенный для определения скорости ветра с последующей передачей данных к контроллеру.
- 7) Флюгер: прибор, определяющий направления ветра.
- 8) Высокоскоростной вал, вращающий ротор электрогенератора.

- 9) Гондола, располагающаяся в верхней части ВЭУ и являющаяся несущей частью конструкции. Внутри нее находятся такие конструкционные узлы как: валы, редуктор, генератор, котроллер и тормоз.
- 10) Мачта, представляющая собой полую конструкцию из металла или бетона, служащая для размещения всех основных элементов на высоте.
- 11) Тормоз, предотвращающий поломки установки и используемый для останова ротора в критических ситуациях (при скорости ветра > 25 м/с).
- 12) Лопасти, являющиеся ключевым элементом ветроустановки, предназначенным для улавливания энергии ветра. Благодаря лопастям осуществляется базовое функционирование данного устройства. Поток ветра, попадая на лопасти, приводит их в движение и обеспечивает вращение ротора и в дальнейшем выработку энергии генератором.

Основные принципы работы ВЭУ: Лопасти ветроколеса связаны с ротором, к которому крепится вал, поток ветра набегает на лопасти ветроколеса и приводит их в движение. Этот вал через муфту соединяется с входным валом редуктора. Далее к выходному валу редуктора присоединяется генератор, который и вырабатывает электрическую энергию. Главной функцией редуктора является повышение скорости вращения вала до величины необходимой генератору.

1.3.1 Классификация по масштабу и сферам использования

Ветрогенераторы по масштабу и сферам использования подразделяются на 3 категории: а) Промышленные; б) Коммерческие; в) Бытовые.

а) Промышленные ветрогенераторы

Промышленные ВЭУ — генераторы большой мощности, используемые для производства электричества в промышленных масштабах. Обычно — это трехлопастные ветряки с горизонтальной осью вращения ротора (классическая конструкция) и высотой мачты более 100 м.



Рисунок 5. Промышленные трёхлопастные ветроэнергетические установки

б) Коммерческие ветрогенераторы

Они могут быть построены по иной схеме, но большинство компаний предпочитают использовать ветрогенераторы классической конструкции. Основным отличием коммерческой ветроэнергетики от промышленной является сугубо экономические, а не технико-характеристические факторы. Коммерческая ветроэнергетика, как правило, создаётся и развивается за счёт негосударственных видов финансирования. Так, например, 5 июня 2009 года немецкий электротехнический конгломерат, являющийся по совместительству акционерным обществом, объявил о постройке первой в мире плавающей коммерческой ветроэнергетической турбины, произведенной компанией Siemens Gamesa Renewable Energy.

в) Бытовые ветрогенераторы

Принцип работы любого бытового ветрогенератора прост и сходен с принципом работы промышленных. Главными отличиями бытовых ВЭУ являются: значительно меньшие объёмы вырабатываемой электроэнергии, размеры (бытовые ветрогенераторы существенно меньше промышленных), относительная доступность и дешевизна комплектующих частей. Также для бытовых ветрогенераторов существенно производится эксплуатация и установка.

1.3.2 Классификация по месту расположения

а) Наземные ВЭУ

Такие ветряки считаются самыми распространенными: их монтируют на холмах, возвышенностях, подготовленных заблаговременно площадках. Монтаж таких установок происходит с использованием сложной строительной техники, так как элементы конструкций требуется фиксировать на большой высоте.

б) Прибрежные ВЭУ

Данные ВЭУ строят в прибрежной части моря, океана. На работу генератора оказывает влияние морской бриз, за счет него роторное устройство производит энергию значительное количество времени.

в) Шельфовые или оффшорные ВЭУ

Ветрогенераторы данного типа устанавливают в море обычно на дистанции от нескольких сотен метров до километра от берега. Такие устройства создают энергию из регулярного морского ветра. В последующем, энергия к берегу попадает по специальному кабелю.



Рисунок 6. Шельфовые ВЭУ

1.3.3 Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения

В современном мире ветроэнергетические установки горизонтально-осевой конструкции являются самыми используемыми (98% от всех типов ВЭУ)[6]. Оси всех валов у ВЭУ данной конструкции расположены параллельно земле.

Такой вариант исполнения получил название «ветряной мельницы». Максимальная эффективность работы ВЭУ достигается, когда ветровой поток перпендикулярен ротору и соответственно лопастям.

Конструкция горизонтальных ветрогенераторов малого размера выполнена так, что передняя часть ветряного колеса, осуществляя поиск ветра, поворачивается автоматически, кроме того, угол поворота лопастей может меняться тоже, чтобы уловить даже небольшой ветер. Вышеперечисленные функции на данный момент не доступны в эксплуатации промышленных ВЭУ большого размера.

Считается, что горизонтальный тип ветрогенераторов пригоден для производства большого объема электроэнергии. Горизонтальные ветровые установки характеризуются высоким КПД (40-50%). Поэтому именно эта разновидность обычно используется при создании систем ветряных электростанций.

У ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения ветроколесо может выполняться с различным количеством лопастей. В зависимости от этого различают одно-, двух-, трех- и многолопастные модификации.

В состав ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения в обязательном порядке входят дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие ориентацию ротора по ветру, что усложняет конструкцию и является недостатком данной разновидности ВЭУ. Преимуществом, по сравнению с вертикально-осевыми моделями, ветрогенераторов с горизонтальным валом является большая эффективность в выработке ими электроэнергии. Это объясняется тем, что углы атаки в рабочих режимах здесь меньше. Поэтому ветрогенераторы с горизонтальным вращением вала отличаются меньшими массогабаритными показателями по отношению к вертикальным ВЭУ, генерирующих одинаковую мощность.

Конструктивные вариации исполнения горизонтальных ВЭУ:

а) Однолопастные ветрогенераторы

Главное преимущество однолопастных ветрогенераторов – высокие обороты вращения. У данного типа ВЭУ вместо второй лопасти установлен противовес, мало влияющий на сопротивляемость движению воздуха, что даёт возможность использовать их для генераторов с высокими оборотами вращения, в том числе асинхронными. Однолопастные ветрогенераторы могут работать при очень слабых ветрах.

Основные недостатки однолопастных ветрогенераторов:

- Из-за высокой скорости вращения велик гироскопический эффект, действие которого замедляет поворот ротора при смене направления ветра и создает дополнительную нагрузку на лопасти, ступицу и узел поворота;
- Повышенная опасность при функционировании установки, объясняемая тем, что сила удара быстроходной лопастью выше, чем тихоходной.
- Необходимость точной балансировки лопасти.



Рисунок 7. Однолопастная ВЭУ. Модель ВЭУ-1/3, ООО «Электроветер»

б) Двухлопастные ветрогенераторы

ВЭУ данного типа конструктивно схожи с однолопастными, только отличаются количеством лопастей. По сравнению с однолопастной конструкцией, они имеют преимущество, так как количество лопастей у них четное, ротор ветроколеса остается уравновешенным при любом угловом положении его лопастей. Как следствие, в данном типе ВЭУ не используются дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие уравновешенность конструкции. Упрощение конструкции ведет к снижению стоимости данной модификации по сравнению с аналогичной моделью однолопастной ВЭУ.

Недостатком рассматриваемой конструкции является высокий уровень шума, а также вибрационные колебания, производимые в процессе функционирования.



Рисунок 8. Двухлопастная ветроэнергетическая установка Gev MP номинальной мощностью 275 кВт французской фирмы Vergnet S.A

в) Трехлопастные ветрогенераторы

Горизонтально-осевые трёхлопастные ветрогенераторы являются самыми распространёнными.

Исследования, проведенные датскими учеными еще в 70-х годах прошлого века, показали, что оптимальное количество лопастей горизонтальных ветрогенераторов равно трем. Данное утверждение было хорошо усвоено крупными производителями ветрогенераторов. Поэтому именно ветряки с горизонтальным расположением оси наиболее широко представлены на рынке. Ветрогенераторы с тремя лопастями выпускаются с мощностями от нескольких ватт до нескольких мегаватт. В качестве примера, на рисунке 5 представлена одна из самых мощных на сегодняшний день трехлопастных ветроэнергетических установок модели Vestas V-164, производимая датской компанией Vestas и имеющая номинальную мощность до 10 МВт.



Рисунок 9. ВЭУ Vestas V-164

г) Многолопастные ветрогенераторы

К многолопастным относятся горизонтально-осевые ветрогенераторы с количеством лопастей от 4 до 50. Роторы ВЭУ с большим количеством лопастей способны развить значительный крутящий момент, что, несомненно, является их достоинством. Однако такие ветроколеса отличаются большим моментом инерции, поэтому они – тихоходные. Отмеченные здесь конструктивные особенности и технические характеристики многолопастных ветрогенераторов подходят по техническим требованиям для энергопитания водяных насосов. Поэтому их обычно применяют в качестве альтернативных источников электрической энергии в водонасосных системах.



Рисунок 10. Внешний вид многолопастной ВЭУ

1.3.3 Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения

Вертикальные ветрогенераторы характеризуются вертикальным расположением оси вращения относительно земли. Их также можно разделить на 3 подвида по типу используемого ротора.

а) С использованием ротора Савониуса.

В составе конструкции имеется несколько полуцилиндрических элементов, выполняющих функцию лопастей. Лопасти такого ротора представляют собой изогнутые плоскости, объединенные обычно по 2 шт. Потоки ветра, попадающие на заднюю часть лопатки, благодаря ее закругленной форме, мягко омывают ее и делятся на две части. Одна уходит в сторону, а другая соскальзывает на рабочую сторону второй лопасти и способствует усилению ее вращения.

Преимущества данного ветрогенератора:

- высокий уровень технологичности;

- качественный пусковой крутящий момент, а также способность функционировать даже при незначительной силе ветра (от 3м/с).

Недостатки данного ветрогенератора:

- низкоэффективная работа лопастей, неполное использование ветровой энергии и, как следствие, низкая эффективность преобразования энергии воздушного потока;
- потребность в большом количестве материалов в процессе изготовления.



Рисунок 11. ВЭУ с ротором Савониуса

б) С использованием ротора Дарье.

На вращательной оси устройства располагается несколько лопастей, которые в совокупности имеют вид полосы.

Преимущества данного ветрогенератора:

- отсутствие необходимости ориентироваться на ветровой поток;
- отсутствие сложностей в процессе изготовления простое и удобное обслуживание. Основной вал привода располагается вблизи уровня земли, что создаёт удобство в его обслуживании.

Недостатки данного ветрогенератора:

- ВЭУ с ротором Дарье обладает довольно низким КПД;
- Обладает непродолжительным межремонтным циклом;
- Главным недостатком такого ветрогенератора является то, что ротор нужно запускать вручную;
- ВЭУ с ротором Дарье достаточно шумен в работе.



Рисунок 12. ВЭУ с ротором Дарье

в) С использованием геликоидного ротора.

Ветрогенератор данного типа является модификацией ротора Дарье. Его последнего выполнены в форме геликоидной кривой, что придаёт

конструкции более равномерное вращение и снижает нагрузки на опорную часть. Изгиб лопастей ротора по диагонали способствует быстрому набору скорости.

Преимущества данного ветрогенератора:

- Эффективность использования ветрового потока довольно высока. Она приближается к эффективности использования горизонтальных устройств.

Недостатки данного ветрогенератора:

- Производит звуковые волны, расположенные в коротковолновой части звукового спектра;
- Геликоидный ротор дорог в производстве из-за сложной конфигурации профиля лопастей.



Рисунок 13. ВЭУ с геликоидным ротором

г) Многолопастной ротор.

ВЭУ с многолопастным ротором представляет собой модификацию вертикально-осевой конструкции ветроколеса, дополненной внешним кольцом неподвижных лопастей.

Преимущества данного ветрогенератора:

- Такая схема способствует увеличению полезной площади захвата воздушного потока, его сжатию и ускорению, что приводит к повышению эффективности ветрогенератора.
- Конструкция чувствительна к слабым воздействиям ветра, следовательно, обладает низкой скоростью запуска.

Недостатки данного ветрогенератора:

- Многолопастной ротор характеризуется повышенной материалоемкостью, что увеличивает стоимость ветрогенератора в целом.
- В процессе эксплуатации конструкцию ветрогенератора с многолопастным ротором сопровождает довольно высокий звуковой фон



Рисунок 14. ВЭУ с многолопастным ротором

Выводы к разделу 1.3

На основе изучения конструкционных, технологических и технических особенностей ВЭУ различных конструкций можно сделать следующие выводы:

1) Вертикально-осевой ветрогенератор обладает меньшим начальным моментом (моментом запуска) выработки электроэнергии. Как следствие, данный вид ВЭУ способен функционировать при минимальных скоростях ветра. Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки имеют большую номинальную мощность, следовательно, они способны снабжать потребителей большим объёмом электроэнергии.

2) Поскольку все основные технические узлы вертикально-осевых ВЭУ находятся в районе основания мачты, на которую они устанавливаются, доступ к их обслуживанию становится более высоким.

3) Вертикально-осевые ВЭУ менее подвержены влиянию разнонаправленного ветра больших скоростей, так как они обладают довольно низким сопротивлением ветру.

5) Горизонтально-осевые ВЭУ имеют более высокий КПД и как следствие большую выработку электроэнергии.

6) Одним из главных недостатков горизонтальных ветрогенераторов можно считать необходимость как можно более перпендикулярного воздействия ветра по отношению к ротору. Если бытовые ВЭУ небольших размеров имеют возможно ориентироваться по преобладающему ветру с помощью флюгера, то промышленные ВЭУ больших размеров являются стационарными. Тем не менее, потери в перпендикулярной направленности ветра по отношению к ротору и, как следствие, потери в выработке электроэнергии, они могут компенсировать за счёт площади охватываемого лопастями пространства, которое на данный момент может достигать 23700 м².

С учетом всех вышеперечисленных технических и функциональных преимуществ ВЭУ горизонтально-осевого типа, а также того факта, что 98% ВЭУ, производимых и эксплуатируемых на мировом ветроэнергетическом рынке, имеют именно горизонтально-осевую конструкцию, можно сделать вывод целесообразности их установки и дальнейшего использования в качестве альтернативного источника выработки электроэнергии.

1.4 Ветровой климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Основополагающими показателями, используемыми при анализе ветрового климата, каких-либо территорий являются:

- Среднегодовая скорость ветра;
- Максимальная скорость ветра.

Данные по этим показателям на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области за несколько последних десятилетий представлены на в таблице 1.4.1. Красным шрифтом подписана станция с наибольшей среднегодовой скоростью ветра.

Расположение метеостанции	Среднегодовая скорость ветра (на высоте 10м)	Средняя скорость ветра (м/с)				Максимальная скорость ветра (м/с)
		Зима	Весна	Лето	Осень	
Санкт-Петербург	2	2,1	2	1,7	2,2	22
Винницы	2,4	2,4	2,5	2,1	2,6	25
(Подпорожский район)						
Воейково	2,3	2,2	2,6	1,9	2,4	23
(Всеволожский район)						
Вознесенье (Подпорожский район)	1,9	2	2	1,6	2,1	19
Волосово	3,3	3,6	3,2	2,8	3,4	28
Выборг	3	2,9	2,8	2,9	3,3	29
Ефимовский	2	2,1	2	1,8	2	23
(Бокситогорский район)						
Кингисепп	2,2	2,4	2,2	1,9	2,2	21
Кириши	2,6	2,7	2,7	2,2	2,8	22

Кронштадт	2,9	3	2,7	2,5	3,3	26
Лесогорский	1,8	1,7	1,9	1,6	1,9	20
(Выборгский район)						
Лодейное Поле	1,8	1,9	1,9	1,6	1,9	20
Ломоносов	2,5	2,7	2,6	2,1	2,6	22
Любань (Тосненский р-н)	1,7	1,8	1,8	1,4	1,9	20
Новая Ладога	2,6	2,6	2,7	2,3	2,8	24
(Волховский район)						
Озерки (Выборгский р-н)	3	2,8	2,2	3	4	29
Ретюнь (Лужский р-н)	2,5	2,6	2,5	2,1	2,6	21
Сиверский (Гатчинский р-н)	2,6	2,7	2,7	2,3	2,7	23
Сосново (Приозерский р-н)	1,9	1,9	1,9	1,5	2,1	23
Тихвин	2,1	2,1	2,2	1,9	2,2	23
Шлиссельбург/Кировский район	1,5	1,6	1,6	1,1	1,7	22

Таблица 1.4.1. Таблица с данными среднегодовых скоростей по городам и районам Ленинградской области

Анализируя данные, в приведённой выше таблице, можно сделать вывод, что показатели среднегодовых скоростей ветра по Санкт-Петербургу и всей Ленинградской области очень невысоки. Важным фактором является то, что все вышеперечисленные показатели измерялись на высоте стандартного стационарного флюгера(10м), а установка самых мощных на данный момент промышленных ВЭУ подразумевает под собой необходимость анализа скорости ветра на высотах больше 70 м , что ставит под сомнение актуальность использования в расчётах стационарных данных по среднегодовой скорости ветра.

2 Исследование ветрового режима Санкт-Петербурга и Ленинградской области

2.1 Исходные данные

Оценка и анализ произведены на основе материалов аэрологических зондирований атмосферы, выполняемых на базе станции Воейково (Ленинградская область) на всём протяжении 2021-го года. Величина измерения данных по скорости ветра была представлена в виде узлов.

На сайте университета Вайоминга были получены данные:

- 1) 80-ти зондирований за 4 годовых сезона;
- 2) 1022-х измерений на различных высотах;
- 3) По ночным и дневным срокам.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1011.0	72	-17.9	-19.6	87	0.81	0	0	254.4	256.7	254.6
1002.0	143	-16.1	-17.5	89	0.97	85	12	256.9	259.6	257.1
1000.0	159	-15.7	-17.0	90	1.02	85	12	257.4	260.2	257.6
979.0	320	-12.1	-12.5	97	1.50	99	13	262.6	266.8	262.9
970.0	391	-10.9	-11.6	95	1.63	105	14	264.5	269.1	264.8

Рисунок 15. Пример данных, полученных на сайте Вайомингского университета. В столбце SKNT представлена скорость ветра (в узлах), в столбце представлено направление ветра (в градусах)

2.2 Классификация скоростей ветра и зависимость от них мощность ВЭУ

Для того чтобы определить: какими показателями должна обладать конкретная модель ветроэнергетической установки, какое количество ВЭУ должно быть размещено в конкретном регионе для выработки определённого объёма электроэнергии, нужно понять, как градируется по величине скорость ветра и каким образом данные величины могут воздействовать на работу ветрогенератора в целом. Влияние скорости ветра на работу ВЭУ продемонстрировано на рисунке 16.

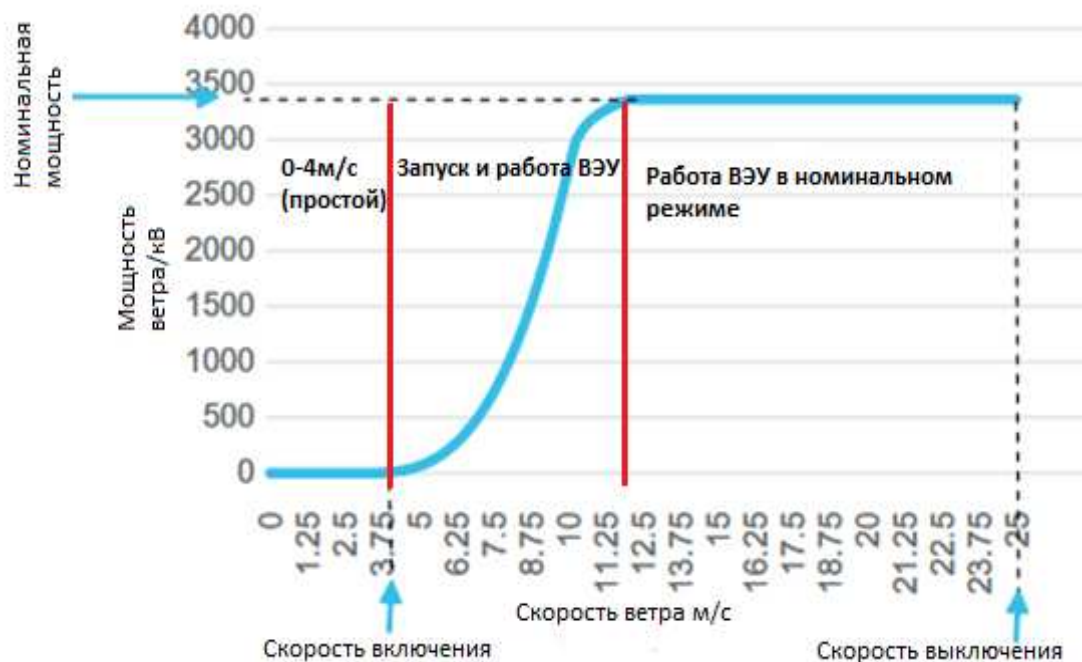


Рисунок 16. График хода мощности вырабатываемой ВЭУ, в зависимости от скорости ветра, где синяя изогнутая линия – это кривая мощности

На таком графике можно выделить несколько характерных значений скорости ветра, которые будут использованы для расчётов работы ВЭУ:

- 1) $V < 4$ м/с – скорость ветра, соответствующая простоя ВЭУ;
- 2) $V = 4$ м/с – минимальная скорость запуска ВЭУ;
- 3) $V = 12$ м/с – начальная скорость номинального режима (режим с наиболее эффективной выработкой электроэнергии);
- 4) $V = 25$ м/с – максимальная скорость ветра, выше которой ВЭУ автоматически останавливается из соображений ее надежной работы и срока службы[7].

2.3 Оценка повторяемости скоростей и направлений ветра

2.3.1 Сезонная и годовая повторяемость скоростей ветра по данным аэрологических зондирований

а) Сезонная повторяемость

Первоначальным действием для обработки данных по ветру стал перевод скорости из величины узлов в величину метров в секунду. На представленных круговых диаграммах(рисунок 17) показаны сезонные данные

по преобладанию различных скоростей ветра на высотах >70 м в соответствии с вышеперечисленными градациями. Можно наблюдать, что количество дней со скоростями ветра >12 м/с, при которых ВЭУ выходят на номинальную мощность, больше в осенний и весенний периоды.

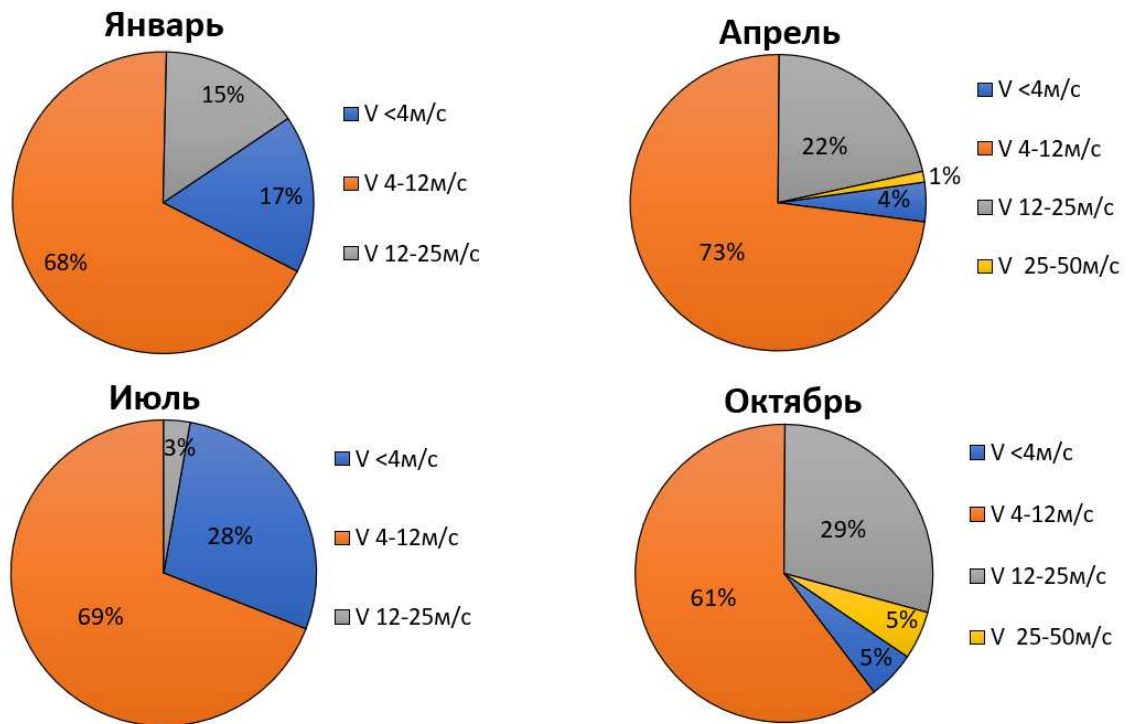


Рисунок 17. Повторяемость скоростей ветра (в %) по сезонам

б) Годовая повторяемость

На круговой диаграмме, изображенной на рисунке 17, представлены повторяемости градационных ветров за весь рассматриваемый период.

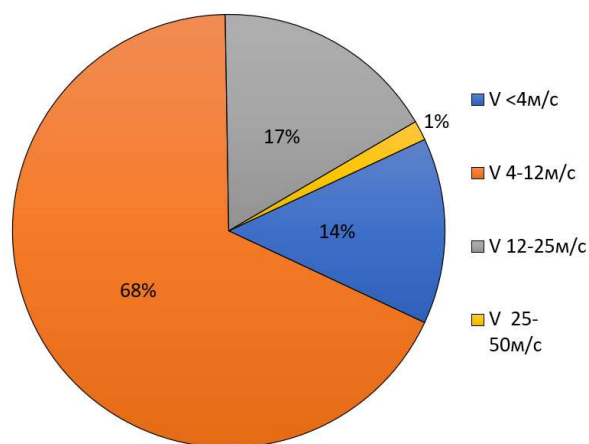


Рисунок 18. Повторяемость скоростей ветра (в %) за весь год.

Время простоя ВЭУ вследствие недостаточной (<4 м/с) или критической (>25 м/с) скорости ветра составит за год в Санкт-Петербурге 15%.

2.3.2 Моделирование вертикального профиля скорости ветра

Наилучшим способом показать, как сильно может изменяться скорость ветра с высотой, является построение вертикального профиля скорости, который представлен на рисунке 19.

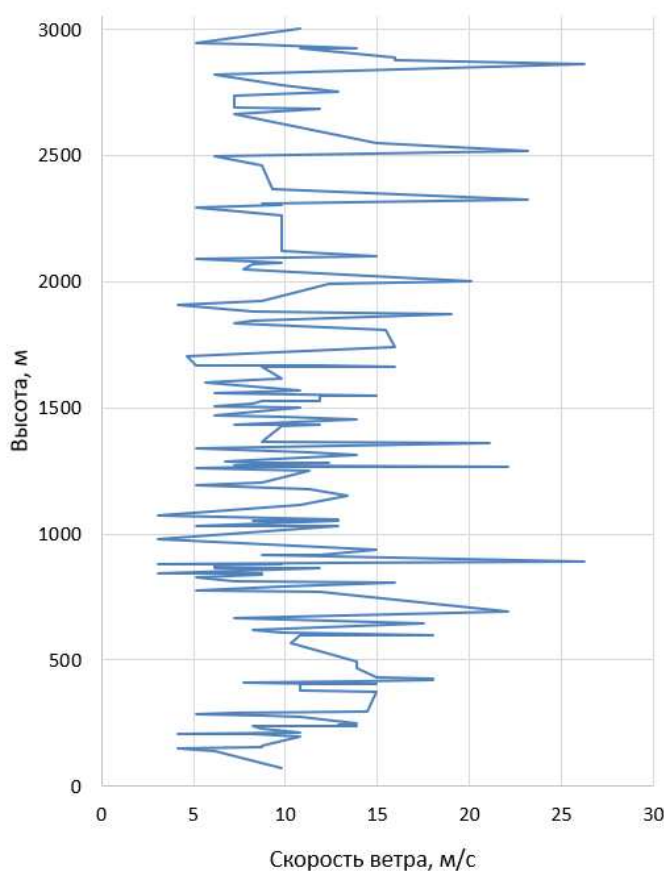


Рисунок 19. Аэрологический профиль скорости ветра по данным станции Воейково за весенний период

Следствием анализа представленных данных по ветру является рассмотрение теоретического использования энергии ветра на высотах отличных от стандартного уровня установки ветроэлектрической установки. Сегодня максимальным уровнем ротора ВЭУ является высота 140 метров. Если увеличить эту высоту до 200-ста или 300-ста метров, можно значительно

увеличить количество вырабатываемой электроэнергии, так как скорости ветра на данных высотах значительно отличаются от скоростей на малых высотах.

2.3.3 Высотная повторяемость скоростей ветра за год и все сезоны, по данным аэрологических зондирований

а) Высотная повторяемость скоростей ветра за год

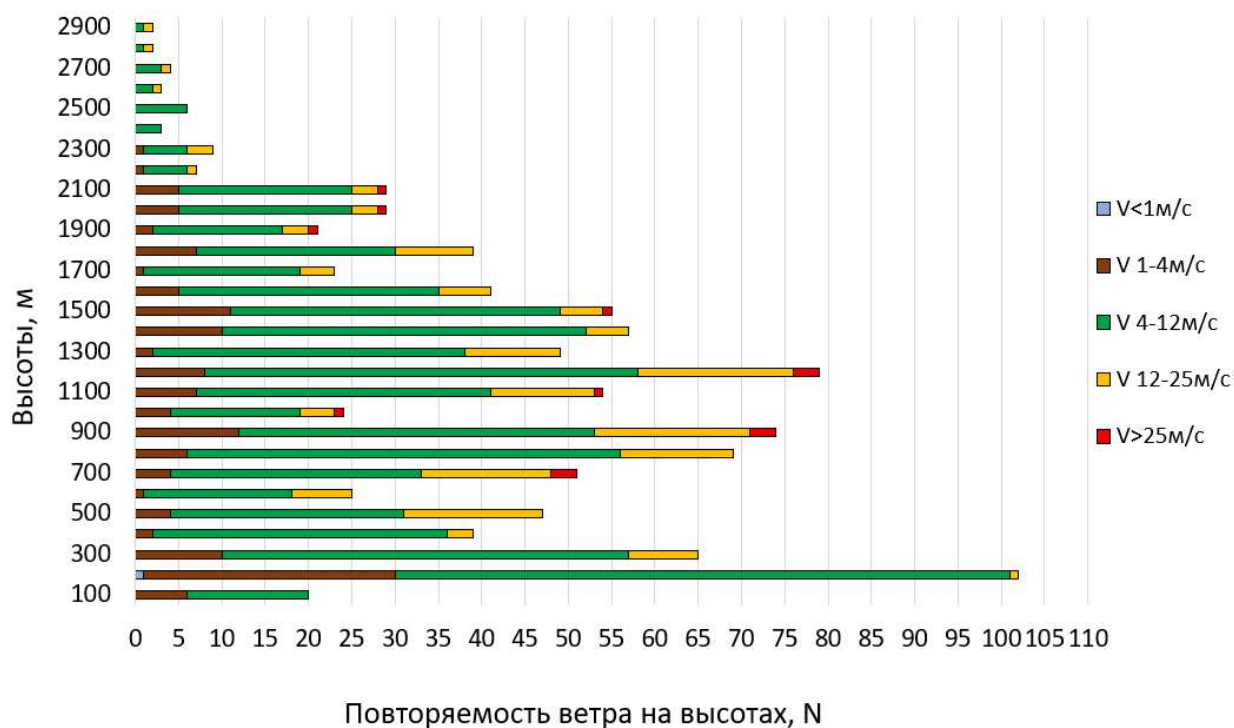


Рисунок 20. Повторяемость ветра различных градаций по высотам за год

Анализируя график, представленный на рисунке 20, можно сделать вывод, что ощущаемое количество номинальных скоростей начинается с высоты 300 м. Скорости, которые опасны для работы ВЭУ, начинаются с высоты 700 м и также наблюдаются на больших высотах.

б) Высотная повторяемость скоростей ветра по сезонам

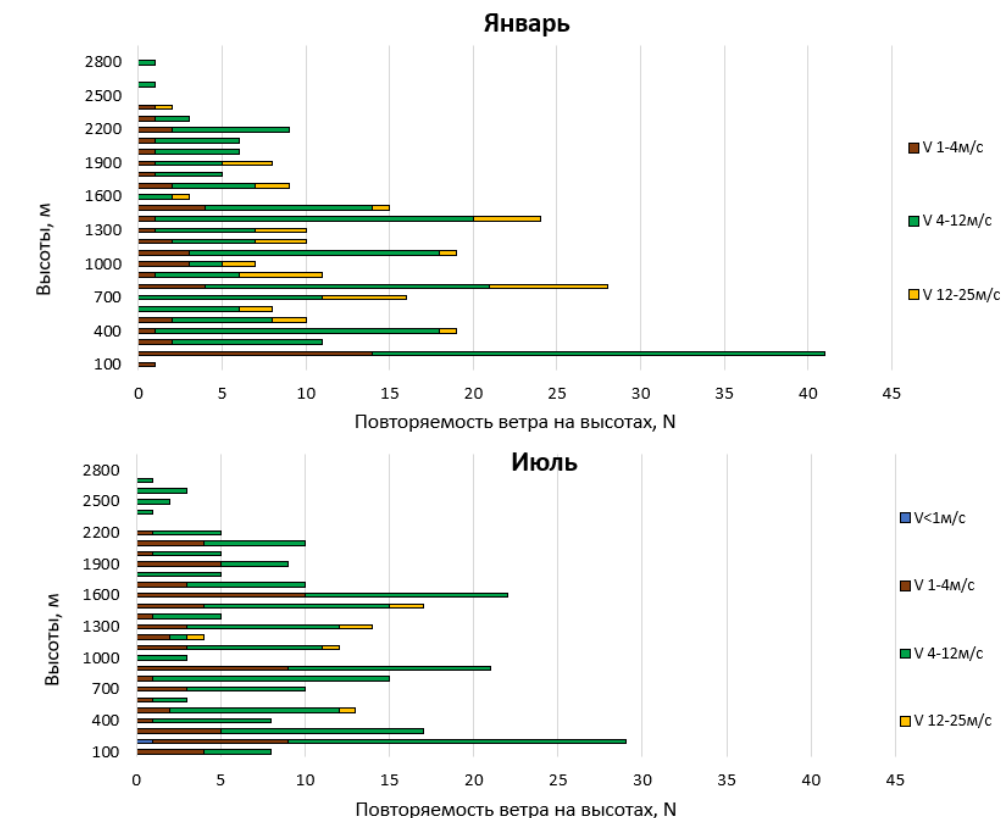


Рисунок 21. Диаграммы повторяемости ветров по высотам за зимний и летний периоды

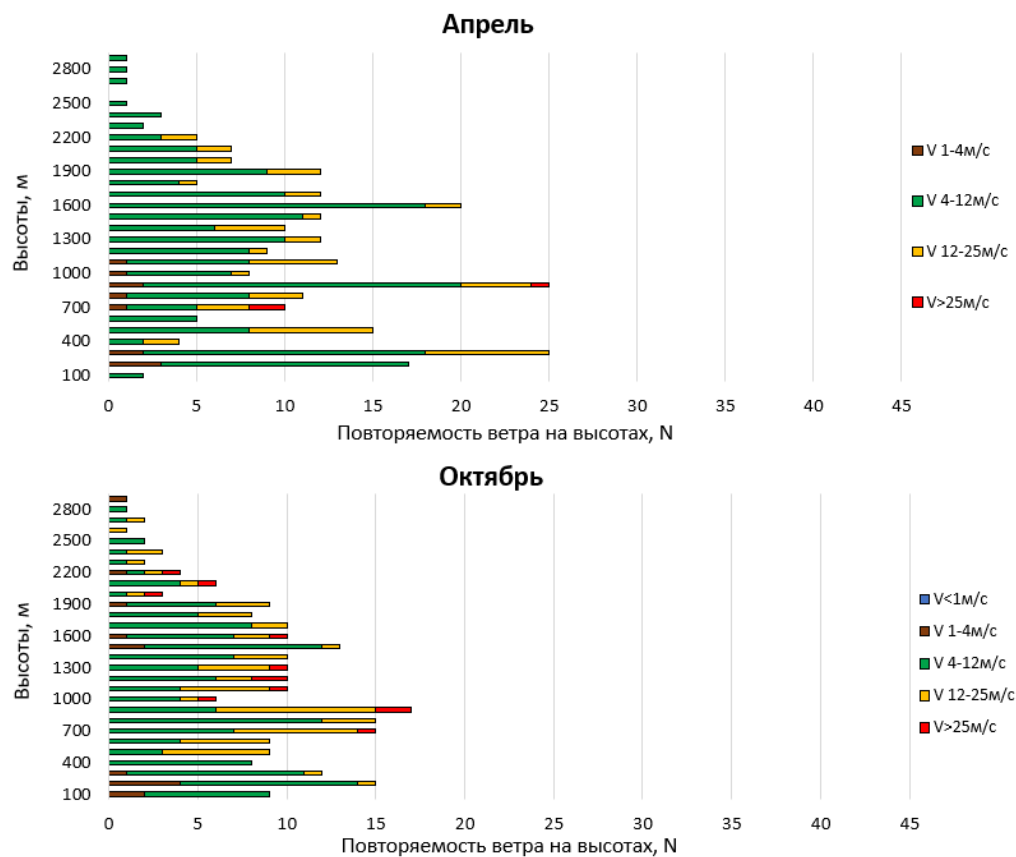


Рисунок 22. Диаграммы повторяемости ветров по высотам за весенний и осенний периоды

По диаграммным данным представленным на рисунках 21 и 22 явно прослеживаются высоты наиболее оптимальные с точки зрения установки ротора ВЭУ в зависимости от сезона.

2.3.4 Розы ветров на различных высотах по данным аэрологических зондирований

При выборе направленности ротора ВЭУ ориентируются на преобладающее направление ветра в регионе. Как правило, это направление измеряют на высоте флюгера(10-15м). Для того чтобы показать, как сильно может отличаться направление приземного ветра от высотного, были рассчитаны две розы ветров, представленных на рисунке 23. Данные по скорости ветра, на основе которых были выполнены розы ветров, регистрировались на высоте флюгера (10 метров над землей) и на высотах 200-500 м.

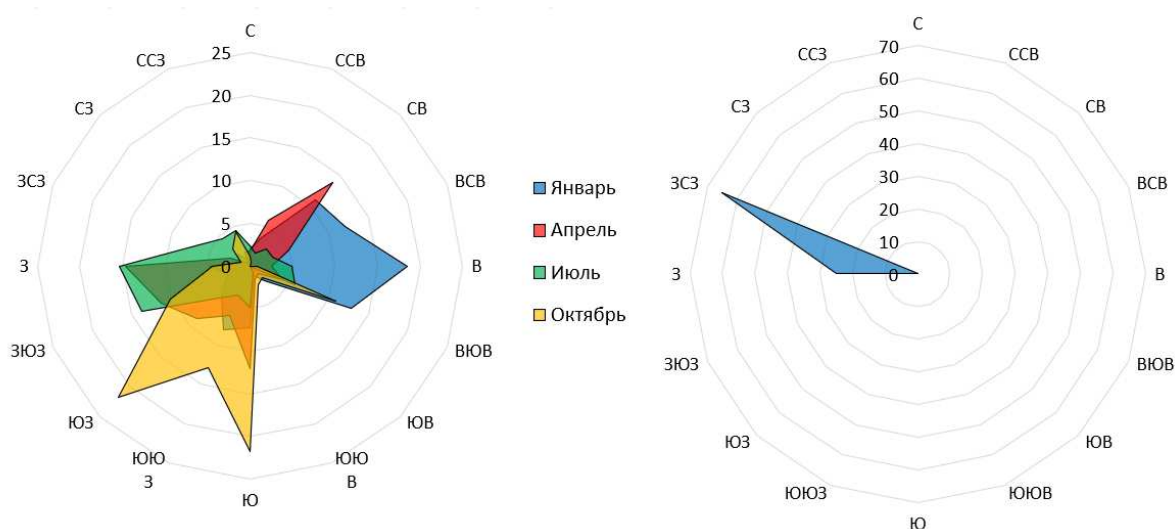


Рисунок 23. Розы ветров для высоты 10 м(слева) и для высот 200-500 м(справа)

Как видно из рисунка 23, преобладающим направлением приземного ветра является южное и юго-западное. Направление ветра на высотах 200- 500 м – юго-юго-западное. Если ориентироваться на данные флюгера и установить ротор перпендикулярно южному направлению, то площадь ветрового потока,

попадающего на ветровое колесо, сократится практически до нуля, поскольку лопасти окажутся ориентированными по ветру. В этом случае, ВЭУ не будет функционировать даже при достаточной скорости ветра.

2.3.5 Выбор оптимальных высот и ориентаций для установки ВЭУ

Результатом анализа данных по измерению скорости и направления ветра по высотам стала таблица 2.3.5.1. Наибольший ветроэнергетический потенциал для установки стационарных ВЭУ имеет высота 500 м(строка с данными по высоте выделена жёлтым цветом) при Западно-Северо-Западном направления ветра, так как на ней время простоя ВЭУ составит 8,5%, время эффективной работы ВЭУ в номинальном режиме составит 34%, общее время работы ВЭУ - 57,5%, что является наилучшими показателями по всем рассматриваемым высотам. На данной высоте можно наблюдать не только значительную повторяемость номинальных скоростей ветра, но также сходные для ориентации ротора направления по каждому из рассматриваемых сезонов.

Высоты,м	Направления, °			
	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
200	-	-	-	280
300	-	281	-	282
400	265	279	-	-
500	265	283	298	282
Направления	З	ЗСЗ	ЗСЗ	ЗСЗ

Таблица 2.3.5.1 Высоты, оптимальные для установки ВЭУ и преобладающие направления ветра на их уровне

Теоретически, если разработать модель ВЭУ, конструктивной особенностью которой будет являться её относительная мобильность, объём выработки электроэнергии такой ВЭУ увеличится в разы. Соответственно, если изменять высоту центра ротора в зависимости от того, на каком уровне преобладает номинальная скорость ветра, а направление её лопастей смещать

перпендикулярно по отношению к превалирующему направлению (чем более перпендикулярно по отношению к ветровому потоку находятся лопасти ВЭУ, тем эффективнее её работа), её функционирование на территории Ленинградской области по сезонам, в соответствии с данными из таблицы 2.3.5.1, будет выглядеть следующим образом:

- 1) В зимний период центр ротора ВЭУ устанавливают на высоте 400м и перпендикулярно к западному направлению ветра;
- 2) В весенний период центр ротора ВЭУ опускают до высоты 300 м (или оставляют на том же уровне) и поворачивают его до западно-северо-западного направления;
- 3) В летний период центр ротора ВЭУ поднимают до 500 м, оставляя западно-северо-западного направление;
- 4) В осенний период ВЭУ можно опустить до 200 м при западно-северо-западного направлении.

Минимальные сезонные высоты, на которых наблюдался значительный объём номинальных скоростей для высоты установки ВЭУ, представлены на таблице 2.3.5.2.

Сезоны	Оптимальные высоты	Оптимальные направления, °
Январь	400	З
Апрель	300	ЗСЗ
Июль	500	ЗСЗ
Октябрь	200	ЗСЗ

Таблица 2.3.5.2 Минимально-оптимальные для высоты для установки ВЭУ

Оценка эффективности установки ВЭУ в Санкт-Петербурге и Ленинградской области

3.1 Пространственный анализ территории

Ветрогенератор следует устанавливать на возвышенностях и как можно дальше от естественных и искусственных препятствий, чтобы получать максимально высокую скорость ветра.[8]

Как правило, чем ближе расположение ротора ВЭУ к поверхности земли, тем меньше скорость ветра. Данный факт можно объяснить результатом действия силы трения у земной поверхности и существования различных препятствий и шероховатостей на поверхности земли. Из-за этих препятствий возникают турбулентные возмущения, действия которых снижают эффективность работы ветрогенератора. По вышеизложенной причине, размещать установку следует либо на поверхности с ровной площадью, либо на значительно больших от уровня земли высотах, где для протекания ветровых потоков существует меньше всего помех. Другими словами, самым лучшим вариантом будет расположить ветроэнергетическую установку на возвышении.

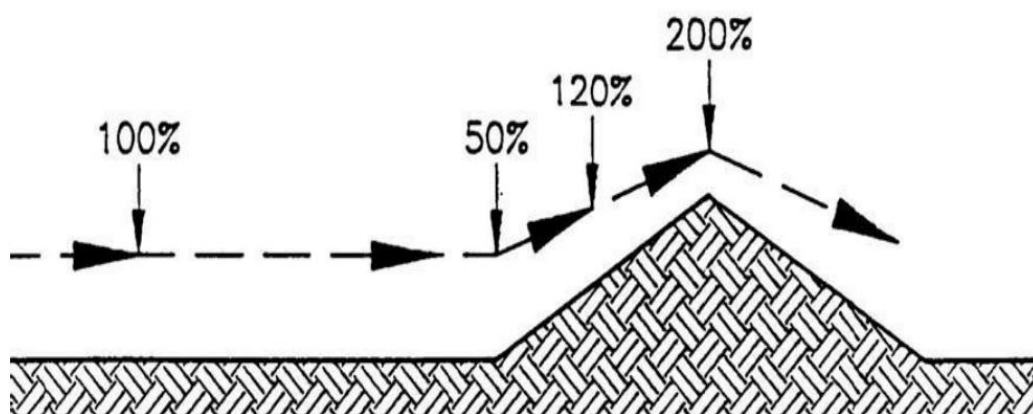


Рисунок 24. Плотность ветрового потока под влиянием рельефа, %

Энергия ветра – это кубическая функция скорости ветра, следовательно, незначительные изменения скорости ветра вызывают существенные изменения объёма вырабатываемой мощности. При удвоении скорости ветра, которое зачастую можно наблюдать на высотах более 100м, вырабатываемая мощность может возрасть в восемь раз, следовательно, имеет смысл рассматривать природные возвышенности для установки ВЭУ на их вершинах.

Значимым фактором является не только информация по нужным для установки высотам на местности, также важен расчёт экспозиции склонов, поскольку необходимо знать, какой склон, в соответствии с преобладающим направлением ветра в данном регионе, будет являться подветренным.

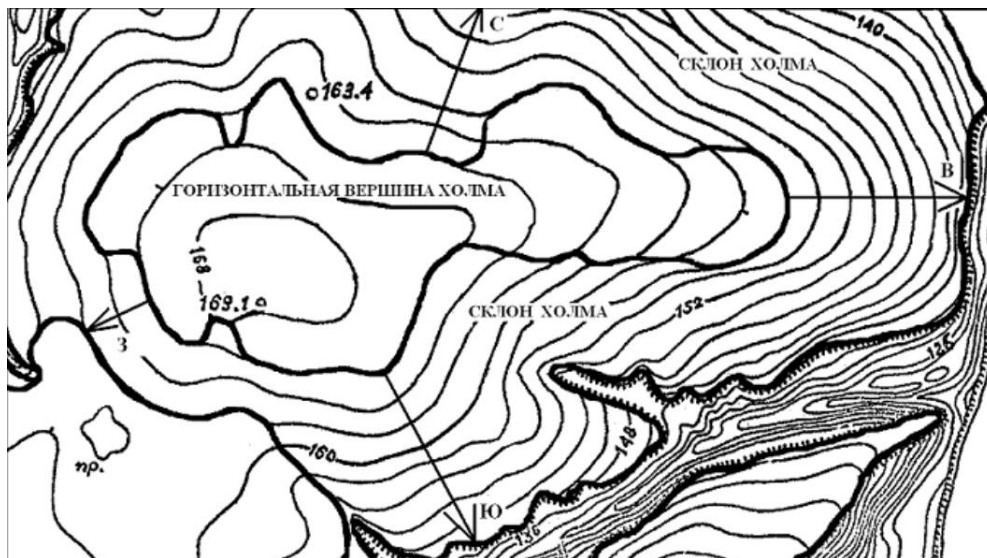


Рисунок 25. Изображение географической направленности склонов
возвышенности

Пространственный анализ территорий был выполнен на основе спутниковых снимков (SRTM), обработанных в геоинформационной системе QGIS. С помощью плагина QuickMapServices (QMS) была добавлена картографическая подложка Google Terrain Hybrid, благодаря которой можно видеть рассматриваемую территорию Санкт-Петербурга и Ленинградской области на рисунке 26. Далее, с помощью создания векторного слоя была воссоздана кадастровая граница Ленинградской области, отмеченная красной линией. Также, с помощью создания векторного слоя условным обозначением (красный треугольник) была выделена станция Воейково, на базе которой проводились аэрологические зондирования.

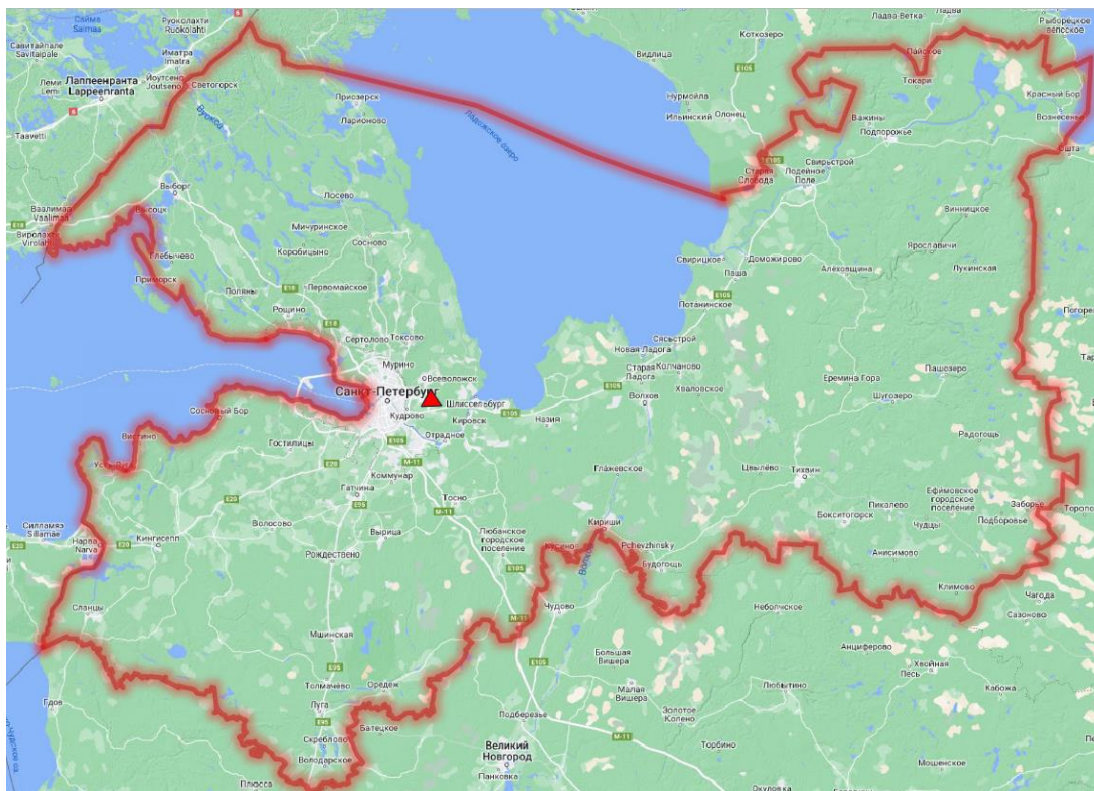


Рисунок 26. Границы Ленинградской области

Далее, с помощью QMS была добавлена картографическая подложка с границами административных районов Ленинградской области.

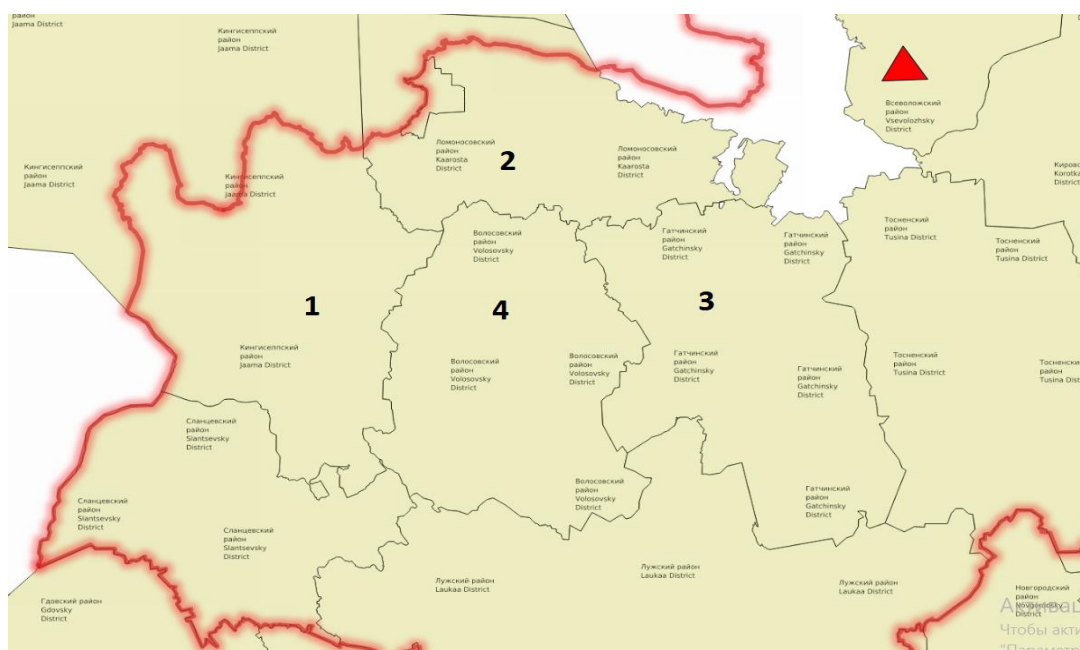


Рисунок 27. Административные районы Ленинградской области. 1) Кенгисепский район; 2) Ломоносовский район; 3) Гатчинский район; 4) Волосовский район.

Пронумерованные районы выбраны для дальнейшего рассмотрения и анализа по причине их орографических особенностей. С помощью обработки SRTM снимков данных районов было создано два слоя. На первом изображены данные по теневому рельефу, на втором, в результате подбора уникальной палитры, - удалось отобразить физический рельеф района. В результате наложения двух вышеперечисленных слоёв, а также слоя с кадастровыми границами районов, получилась карта, представленная на рисунке 28.

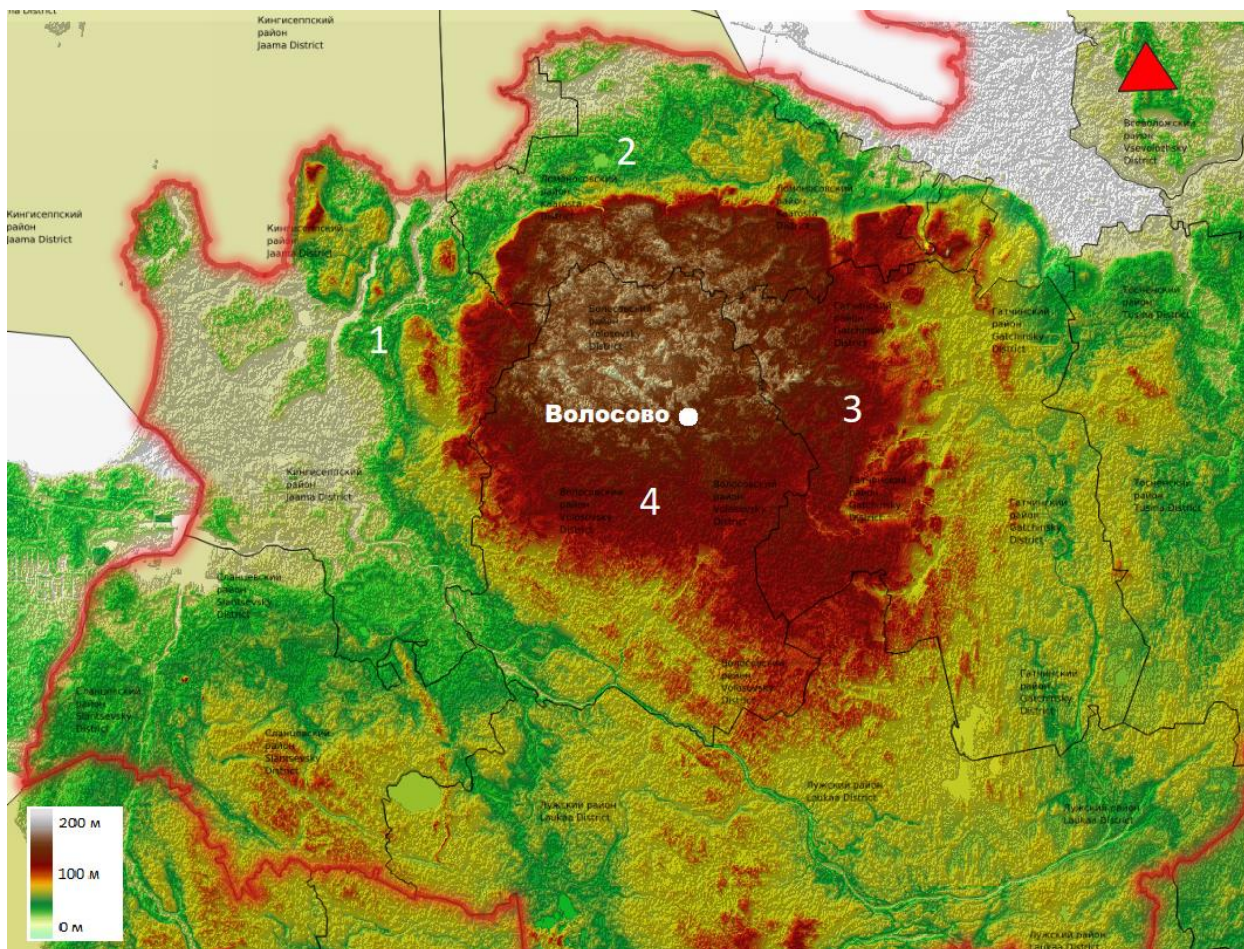


Рисунок 28. Карта рельефа районов Ленинградской области. 1) Кенгисеппский район; 2) Ломоносовский район; 3) Гатчинский район; 4) Волосовский район.

Опираясь на информацию, приведённую на рисунке 28, а также на вышеперечисленные данные по повторяемости скорости ветра на высотах, можно сделать вывод, что для установки ВЭУ на естественных возвышенностях рельефа и увеличения эффективности их работы, следует рассматривать территории Кенигисеппского, Ломоносовского, Гатчинского и Волосовского районов. В подтверждении всего вышесказанного, можно

проанализировать информацию из таблицы 1.4.1, по которой можно сделать вывод, что станция с самым высоким показателем среднегодовой скорости ветра находится в городе Волосово, расположенном на высоте 135 м над уровнем моря и отмеченном на карте, представленной на рисунке 28.

3.2 Построение карты точных мест установки ВЭУ

Следующим шагом, с помощью калькулятора растров, был выполнен расчёт экспозиции, для выделения наветренных склонов, ориентированных на запад-северо-запад. В результате совмещения слоя с кадастровыми границами районов и слоя с информацией по экспозиции получилась карта, представленная на рисунке 29. Красным цветом обозначены территории наветренных склонов.

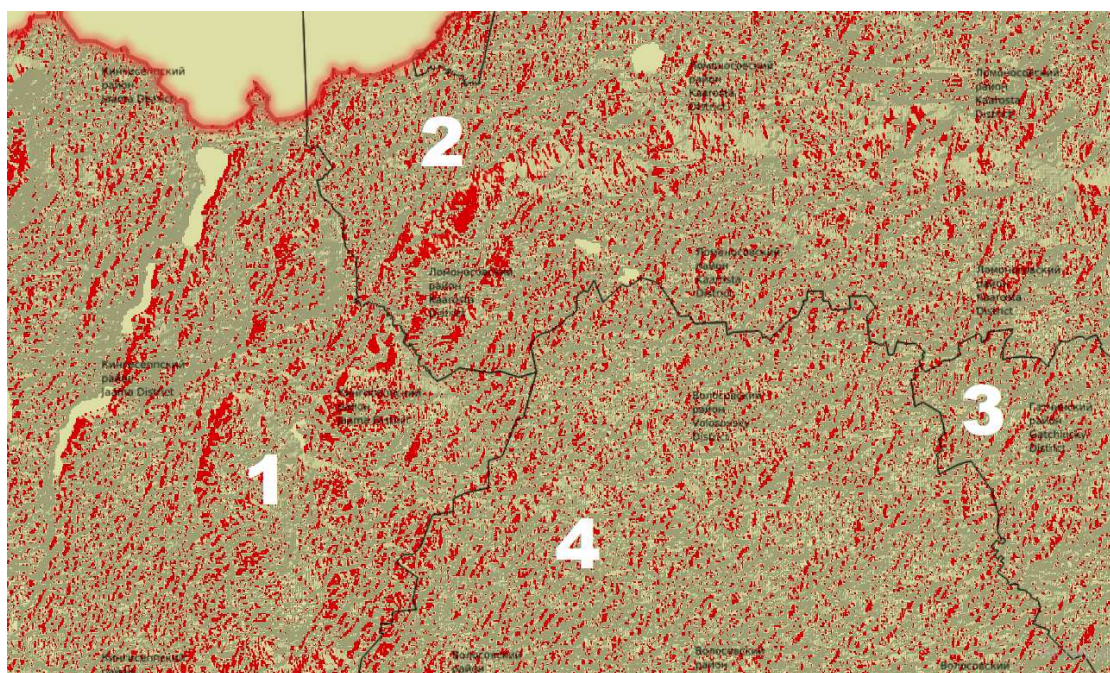


Рисунок 29. Карта экспозиции склонов в пределах следующих районов:

- 1) Кенгисеппского; 2) Ломоносовского; 3) Гатчинского; 4) Волосовского

Далее, также с помощью калькулятора растров был получен слой с высотными зонами более 100 м. В результате совмещения данного слоя (синий цвет) с кадастровыми границами районов, был получен рисунок 30.



Рисунок 30. Карта зон с высотами более 100 м с указанием названий районов.

Аналогичным образом были выделены зоны, с высотами более 150 м (синий цвет), которые можно наблюдать на рисунке 31.

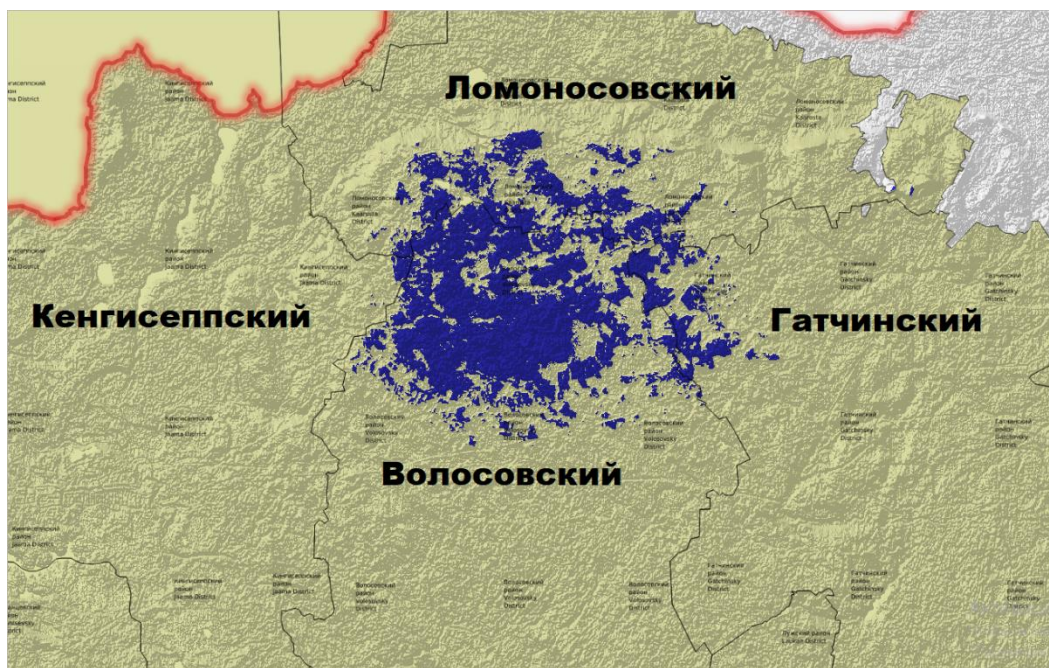


Рисунок 31. Карта зон с высотами более 150 м с указанием названий районов.

Результатами поиска мест подходящих для установки ВЭУ с помощью геоинформационной системы QGIS стали карты 31 и 32.

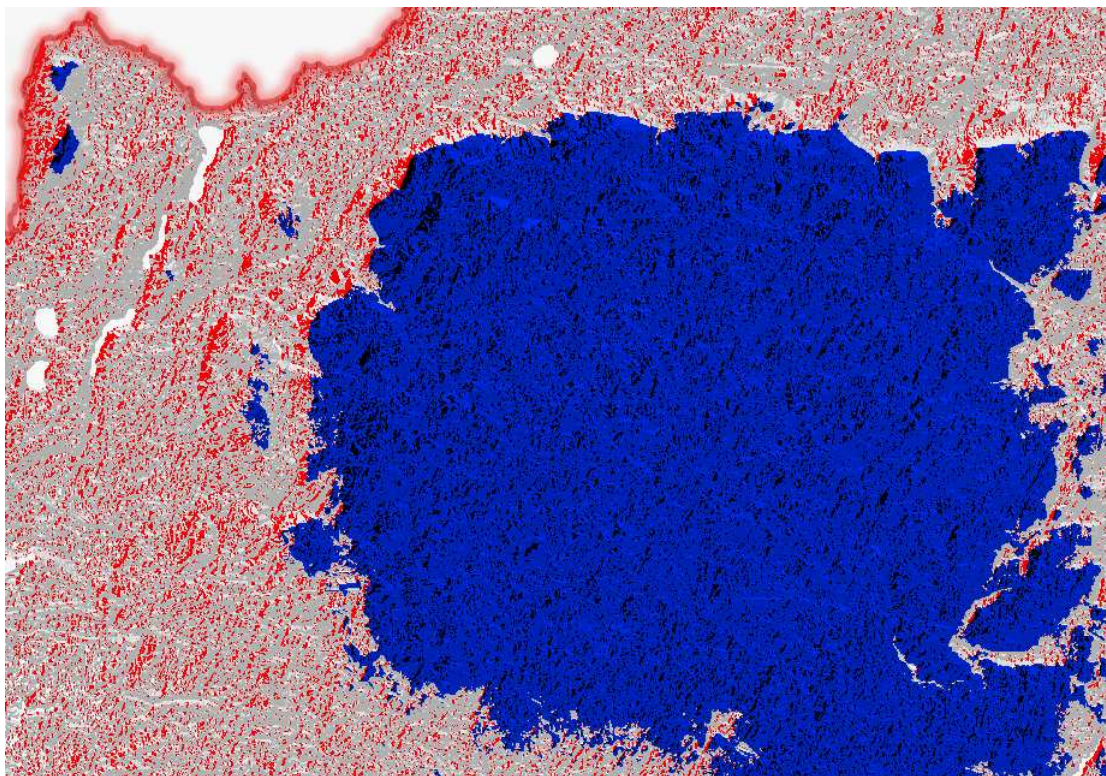
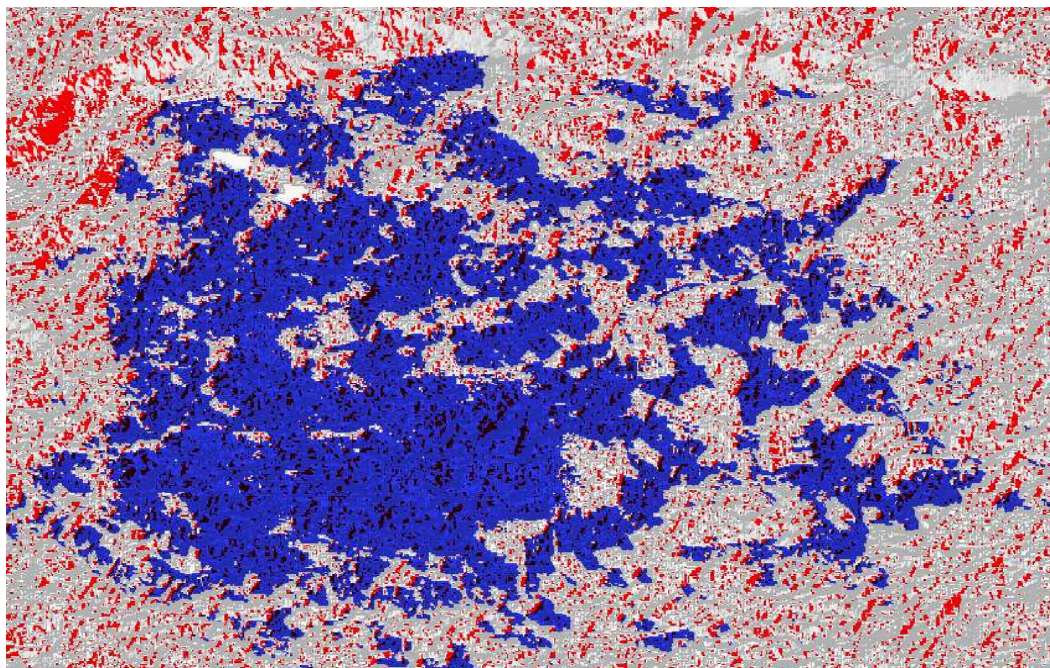


Рисунок 31. Карта юго-западных склонов (красный цвет) и зон с высотами более 100 м (синий цвет).



Карта 32. Карта юго-западных склонов (красный цвет) и зон с высотами более 150 м (синий цвет).

Обработав изначальное SRTM-изображение с помощью такого инструмента как калькулятор растров удалось получить слой с информацией по наветренным склонам всех возвышенностей, а также слой с зонами высот более 100 м. Результатом объединения вышеупомянутых слоёв являются зоны-кластеры черного цвета. Именно в этих зонах территория отвечает двум условиям: 1) Высота её расположения > 100 м; 2) Склоны данной территории сориентированы по отношению к преобладающему в регионе высотному направлению ветра (Западно-Юго-Западному).

Абсолютно идентичным способом были выведены и сориентированы по направлению зоны с высотами >150 м, результатом чего стала карта, представленная на изображении 32.

3.3 Выбор ветрогенератора

После проведения анализа рынка современных моделей ветроэнергетических установок, их достоинств и недостатков оптимальной для установки и ввода в эксплуатацию на территории Ленинградской области была признана модель Vestas V174-9.5.



Рисунок 31. Установка прототипов модели Vestas V174-9.5/ Дания 2021

Несмотря на то, что преобладающее количество моделей ВЭУ, выпускаемое Датской компанией Vestas, являются оффшорными, модель V174-9.5 может устанавливаться как на суше, так и на шельфовых зонах. Данная модель также имеет ряд технических преимуществ:

- Данная модель ВЭУ обладает из самых больших номинальных мощностей в 9500 кВт;
- Довольно низкую стартовую скорость в 3 м/с;
- Диаметр лопастей составляет 174 м;
- Высота мачты может достигать 130 м;
- Ометаемая площадь ветроколеса составляет 27779 м²[9].

3.4 Расчет электроэнергетической выработки ВЭУ без учета и с учетом оптимальных высот.

В качестве основной характеристики ветропотенциала для решения вопроса о целесообразности строительства ВЭУ и ориентировочного выбора ветрогенератора используется среднегодовая скорость ветра $V_{\text{ср}}$ [11]

Зависимость между среднегодовой скоростью ветра и электрической мощностью, вырабатываемой ВЭУ, представлена формулой:

$$P_{\text{эл}} = \xi 0,5 \pi R^2 \rho V_{\text{ср}}^3 \eta \quad (3.4.1)$$

Где ξ — коэффициент использования энергии ветра (для мощных ветроэнергетических установок в номинальном режиме достигает значений 0,4 — 0,5);

R — радиус ротора ветроколеса [м];

ρ — плотность воздуха (при нормальных условиях $\rho = 1,2041$ кг/м³);

$V_{\text{ср}}$ — среднегодовая скорость ветра [м/с];

η — КПД электромеханического преобразователя энергии ($\eta = 0,7 — 0,9$).

Учитывая, что $V_{\text{ср}}$ для высот 100 — 500 м = 6,6 м/с, а самое большое значение $V_{\text{ср}}$, измеряемое в Ленинградской области на уровне 10 м = 3,6 м/с, можно провести сравнения $P_{\text{эл}}$ для этих уровней, используя параметры рассматриваемой ВЭУ Vestas V174-9.5 :

- 1) $P_{\text{эл}}$ для уровня 10 м = 14423 Вт;
- 2) $P_{\text{эл}}$ для уровней 100 — 500 м = 26442 Вт.

Таким образом, показатель выработки электроэнергии в зависимости от среднегодовой скорости ветра на высотах более 100 м практически в 2 раза больше, чем на уровне стационарного флюгера, по высоте которого рассчитываются среднегодовые значения ветра.

Одним из важнейших показателей функционирования ветроэнергетического генератора является его годовая выработка:

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}} = N_{\text{ВЭУ}} \times T_{\text{исп}} \quad (3.4.2)$$

Где $N_{\text{ВЭУ}}$ — номинальная мощность ВЭУ [кВт];

$T_{\text{исп}}$ — годовое количество использования номинальной мощности ВЭУ в год[ч].

Для рассматриваемой модели ВЭУ Vestas V174-9.5 величина $N_{\text{ВЭУ}} = 9500$ кВт.

Величина $T_{\text{исп}}$ для рассматриваемых минимальных сезонных высот, рассмотренных в таблице 2.3.5.2. будет выглядеть следующим образом:

- 1) $T_{\text{исп}}$ в зимнем сезоне (400 м) = 1;
- 2) $T_{\text{исп}}$ в весеннем сезоне (300 м) = 7;
- 3) $T_{\text{исп}}$ в летнем сезоне (500 м) = 1;
- 4) $T_{\text{исп}}$ в осеннем сезоне (200 м) = 1.

Таким образом, величина $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ для ветрогенератора Vestas V174-9.5 с учётом установки ротора ВЭУ на минимальных сезонных высотах будет выглядеть следующим образом:

- 1) $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ в зимнем сезоне (400м) = 9500 кВт/год;

- 2) $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ в весеннем сезоне (300 м) = 66500 кВт/год;
- 3) $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ в летнем сезоне (500 м) = 9500 кВт/год;
- 4) $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ в осеннем сезоне (200 м) = 9500 кВт/год.

Для высоты 500, которая является оптимальной для установки по всем сезонам, характерна общая сходимость в направленности преобладающего ветрового потока, также на данной высоте можно наблюдать большее количество времени действия номинальных скоростей:

- 1) $T_{\text{ИСП}}$ в зимнем сезоне = 1;
- 2) $T_{\text{ИСП}}$ в весеннем сезоне = 2;
- 3) $T_{\text{ИСП}}$ в летнем сезоне = 7;
- 4) $T_{\text{ИСП}}$ в осеннем сезоне = 6.

Как следствие, на высоте 500 м по всем сезонам можно наблюдать большее значение $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$, величина которого будет = 152000 кВт/год.

Если усовершенствовать такую модель ВЭУ как Vestas V174-9.5, таким образом, чтобы центр её ротора мог изменять свою высоту от 200 до 400 м, в зависимости от преобладания сезонных скоростей и направлений ветра, то годовая выработка электроэнергии парком из 500 таких ветрогенераторов составляла бы 47500 МВт. Модифицировав данную ВЭУ, для возможности стационарной установки центра её ротора на высоту 500 м, можно было бы добиться выработки 76000 МВт в год, также парком из 500 таких ветрогенераторов.

Заключение

Ветроэнергетический потенциал Санкт-Петербурга и Ленинградской области будет реализован наиболее эффективно в случае создания мобильных ВЭУ с изменяемой высотой ротора, способных разворачиваться перпендикулярно направлению ветра и подниматься на высоту, где в данный момент присутствует номинальный по скорости ветер. В результате выполнения данной работы, удалось установить, что:

- 1) От установки ВЭУ на стандартную высоту около 100 м в Ленинградской области эффекта не будет, вследствие большого времени простоя из-за высокой повторяемости скорости ветра меньше 4 м/с.
- 2) Наибольший ветроэнергетический потенциал для установки стационарных ВЭУ имеет высота 500 метров при западно-северо-западном направления ветра, так как на ней время простоя ВЭУ составит 8,5%, время эффективной работы ВЭУ в номинальном режиме составит 34%, общее время работы ВЭУ — 57,5%.
- 3) На высоте 500 м парк из 500 усовершенствованных ВЭУ модели Vestas V174-9.5 теоретически сможет вырабатывать 76000 МВт в год.
- 4) Для достижения наибольшей эффективности работы ВЭУ в Ленинградской области, направление ротора после зимнего периода рекомендуется менять с Западного на Западно-Юго-Западное.

В работе был проанализирован характер скорости и направления ветров по высотам в некоторых районах Ленинградской области, а также их орографические факторы. Помимо вышеперечисленных данных, также существует множество других, весьма важных и необходимых для расчёта установки ВЭУ факторов, включающих в себя информацию о качестве и характере почво-грунтов, технические возможности эксплуатации существующих моделей ВЭУ, расчёт площадных параметров установки, максимально допустимые конструкционные нагрузки. Благодаря их обработке

и анализу, можно значительно повысить эффективность работы ветроэнергетических генераторов.