



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

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Оценка ветроэнергетического потенциала Ленинградской области»

Исполнитель Трофимова Екатерина Анатольевна
(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)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 02 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

	стр.
Введение.....	2
1. Ветер как источник энергии.....	5
1.1 Ветер и его характеристики.....	5
1.2 Ветер как источник энергии.....	7
2. Современные ветроэнергетические установки.....	11
2.1 Ветроэнергетические установки с горизонтальной осью.....	11
2.2 Ветроэнергетические установки с вертикальной осью.....	14
3. Ветровой режим Ленинградской области.....	22
3.1 Климат Ленинградской области.....	22
3.2 Ветер на территории Ленинградской области.....	24
Заключение.....	39
Список литературы.....	40

Введение

Использование альтернативных источников энергии является важной задачей для повышения энергетического потенциала нашей страны. К современным альтернативным источникам относятся солнечные, геотермальные, волновые или прибойные, биомассовые и ветряные электростанции. Каждый тип электростанций предъявляет особые требования к географическим и климатическим характеристикам мест установок таких электростанций. Не везде возможно установить гидроэлектростанции и атомные электростанции, а тепловые станции приводят к значительному загрязнению воздуха и уменьшению запасов ископаемого топлива. Ветряные электростанции можно использовать повсеместно, если ветровой режим района установки удовлетворяет техническим характеристикам ветроэнергетических установок, поэтому ветроэнергетике уделяют в нашей стране большое внимание.

В России вопросами использования ветровых электростанций занимается Российская ассоциация ветроиндустрии (РАВИ). В ее докладе на Международном экономическом форуме говорится, что к 2022 году выработка электроэнергии ветровыми электростанциями возросла в полтора раза по сравнению со всем предыдущим периодом использования таких станций, а мощность вырабатываемой энергии составила более 1% мощности в Единой энергосистеме нашей страны. Были введены в строй 75 ветроэнергетических станций (ВЭС), которые вырабатывали суммарно 240 мегаватт электроэнергии. Но в 2022 году, после введения экономических санкций, были заморожены проекты установок ВЭС с расчетной мощностью более 200 мегаватт и все строящиеся объекты ветровых электростанций оказались под угрозой остановки. Это было связано с тем, что на объектах использовалось оборудование производства предприятий Финляндии, Дании, Италии, собственники которых решили уйти с Российского рынка. С их оборудованием была введена первая очередь Кольской ВЭС, которая была построена в Мурманской области, а вот другие проекты оказались остановлены на стадии разработки (например – проект ветропарка в Татарстане).

До 2022 года в России производились три типа ветроэнергетических установок, а в настоящее время в России производят только одну ветроэлектрическую установку ВЭУ Lagerwey L700 на предприятии АО «НоваВинд», но уже более 40 производителей приступили к выпуску комплектующих для ВЭС.

За прошедший период, благодаря политике импортозамещения, наша промышленность позволила перейти к технологической независимости в вопросе создания ветроэнергетических установок и уже к 2026-2027 году можно будет оснащать ветровые электростанции отечественным оборудованием.

Потому важно правильно оценивать ветроэнергетический потенциал России для планирования установок ВЭС на нашей территории. После 2022 года была восстановлена ВЭС в Калининградской области и благодаря протяженной береговой линии для развития ветроэнергетики там складываются очень хорошие условия. Большой ветроэнергетический потенциал наблюдается вдоль побережья Северного Ледовитого океана, в степях Калмыкии и в Ростовской области, но в РАВИ сообщают, что ветровой потенциал можно использовать в любом районе нашей страны, необходимо только найти территории, где использование ВЭС будет экономически эффективной.

Ленинградская область также заинтересована в развитии ветроэнергетики, так как с каждым годом стоимость ветровой энергии будет дешевле. Задача об установке ветропарков в области была поставлена на Петербургском международном экономическом форуме, на котором были подписаны соглашения с правительством Ленинградской области, но проект будет осуществлен только при наличии отечественных станций ВЭС.

Для определения ветрового потенциала Ленинградской области необходимо оценить среднюю годовую скорость и направление ветра на территории области, что явилось основной целью выпускной квалификационной работы. Для достижения цели ВКР решались следующие задачи:

-в первой главе квалификационной работы рассматривался ветер как источник энергии;

- во второй главе анализировалось устройство современных ветроэнергетических установок;

- в третьей главе проведен анализ режима ветра в Ленинградской области и предложены варианты использования ветроэнергетических установок. В заключении представлены выводы по работе.

1. Ветер как источник энергии.

1.1 Ветер и его характеристики.

Ветром называют перемещение воздуха над земной поверхностью. Причиной возникновения ветра является разность атмосферного давления над земной поверхностью, которая возникает из-за неравномерного прогрева подстилающей поверхности солнцем. Можно даже назвать ветровую энергию одной форм проявления энергии солнца. При нагреве солнцем земной поверхности нагревается воздух у земли, и, нагреваясь, он поднимается вверх. На его место приходит менее нагретый воздух. Таким образом ветер всегда перемещается в сторону низкого давления. Характеристиками ветра является его скорость относительно земли и направление.

Скорость ветра имеет хорошо выраженный суточный ход и меняется с течением времени. В дневные часы ветер сильнее там, где альбедо подстилающей поверхности имеет разные значения и почва прогревается неравномерно. Особенно это заметно в прибрежных районах, где вода нагревается медленнее, чем суша, и ветер начинается перемещаться в направлении вода-суша. После захода солнца поверхность земли остывает быстрее, чем водная поверхность и ветер будет направлен в направлении суша-вода. Скорость ветра также зависит от высоты над поверхностью земли. У земли на воздух действует сила трения и он передвигается медленнее, чем на высотах, таким образом, на скорость ветра значительное влияние оказывает рельеф местности, включающий естественные и искусственные препятствия. Поэтому ветроэнергетические установки необходимо размещать на удалении от мешающих препятствий и по возможности на возвышенностях.

Такие препятствия вызывают завихрения воздушного потока и уменьшают эффективность работы ветроэнергетических установок.

Показателем ветрового потенциала местности является среднегодовая скорость ветра. Её значение используют для расчетов энергии, вырабатываемой

ветрогенераторами, которая находится в кубической зависимости от скорости ветра. Таки образом, увеличение скорости ветра в два раза создает увеличение количества вырабатываемой электроэнергии почти в 8 раз.

Второй важной характеристикой, оценивающей ветровой потенциал, является преобладающее направление ветра. Направление ветра зависит от особенностей циркуляции атмосферы, которую определяют по многолетним метеорологическим наблюдениям на метеостанциях. При анализе многолетнего ряда наблюдений за синоптическими процессами учитывают и влияние на направление ветра макромасштабных и мезомасштабных особенностей рельефа местности, наличие крупных водоемов, орографических препятствий. На территории России основными являются зимние и летние циркуляционные процессы. Зимние и летние месяцы (январь и июль) отличаются противоположным распределением атмосферного давления, а значит, и наибольшими различиями в преобладающем направлении ветра. В переходные сезоны происходит постепенная замена зимних процессов летними, и наоборот. В зимний сезон барические поля выделяются более четко, чем в летний, поэтому повторяемость преобладающего направления ветра в январе больше, чем в июле.

Среднегодовая скорость ветра и преобладающее направление ветра являются основными параметрами, которые учитывают при планировании установки ветроэнергетической станции (ВЭС). Рассмотрим ветер с точки зрения источника энергии.

1.2 Ветер как источник энергии.

Современные ветроэнергетические станции являются сложными и достаточно надежными машинами, которые преобразуют энергию ветра в электрическую энергию. Данные о среднегодовой скорости ветра позволяют определить объем электрической энергии, которая может выработать ветроэнергетическая установка в течение года. В рассматриваемых для установки ВЭС районах, среднегодовая скорость ветра должна быть более 4,5 м/с, а для мощных мега-

ваттных станций – более 5,5 м/с, в противном случае установка таких станций будет экономически неэффективной. Территория Российской Федерации обладает большими ветроэнергетическими ресурсами, которые особенно востребованы в тех регионах, где нет централизованного электрического снабжения. К таким районам можно отнести всю территорию побережий Арктического региона, от Кольского полуострова до Чукотки. Распределение ветроэнергетических ресурсов нашей страны позволяет их использовать как крупными, так и автономными ветроэнергетическими станциями в составе местных энергетических систем.



Рисунок 1.1 – Крупная ветроэнергетическая станция.

Уточненные метеорологические данные (в том числе среднегодовые и среднемесячные скорости ветра) по регионам России содержатся в «Атласе ветрового и солнечного климатов России». Если выясняется, что на интересующей территории нет достаточных ветроэнергетических ресурсов, не имеет никакого смысла проводить дальнейшие действия по решению задачи применения ВЭУ в этом месте. На рисунке 1.2 представлена карта ветроэнергетиче-

ских ресурсов Российской Федерации. На карте видно, что энергия ветра может быть эффективно использована в следующих регионах: области: Архангельская, Астраханская, Волгоградская, Калининградская, Камчатская, Ленинградская, Магаданская, Мурманская, Новосибирская, Пермская, Ростовская, Сахалинская, Тюменская; края: Краснодарский, Приморский, Хабаровский; а также: Дагестан, Калмыкия, Карелия, Коми, Ненецкий автономный округ, Таймырский автономный округ, Хакасия, Чукотка, Якутия, Ямало-Ненецкий автономный округ. Перспективными являются и другие отдельные районы многих краев, областей и республик РФ.



Рисунок 1.2 – Ветровые энергоресурсы России

Территория Ленинградской области относится к району со средней годовой скоростью ветра менее 3 м/с., но для получения более полной картины ветровой нагрузки области необходимо провести исследования районов области, особенно тех, которые находятся у больших водоемов.

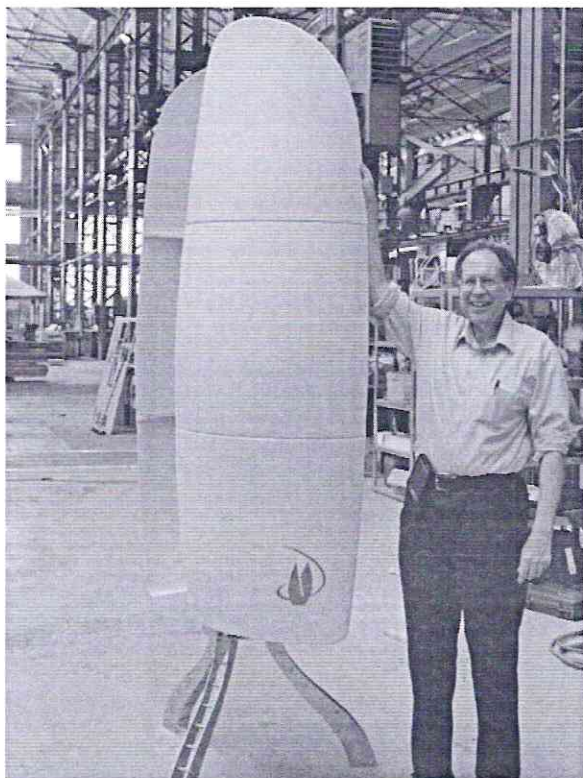


Рисунок 1.3 – Ветроэнергетические установки малой мощности.

В случае, если не будет условий для установки мощных ветроэнергетических станций, их вполне рентабельно будет заменить малыми ветрогенераторами, которые можно использовать совместно с другими альтернативными источниками энергии.



Рисунок 1.4 – ВЭС в поселке Тикси

2. Современные ветроэнергетические установки.

Современные ветроэнергетические установки представляют собой машины, которые преобразуют энергию ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, а затем в электрическую энергию. В настоящее время применяются две основные конструкции, которые мы рассмотрим ниже. Ветроэнергетические установки вырабатывают электроэнергию без ущерба для окружающей среды и являются наиболее привлекательными в условиях высоких широт, с ограниченным количеством солнечных дней и условий для установки больших гидроэлектростанций.

2.1 Ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения.

Самой распространенной конструкцией ветрогенератора в настоящее время является установка, в которой используется турбина с горизонтальной осью вращения. В таких установках ось ротора механически связана с лопастями, конфигурацию которых разрабатывают специально для использования подъемной силы ветра. Лопастей с ротором имеют общее название «ветроколесо».

Ветроколесо преобразует энергию ветрового потока в механическую энергию вращения оси турбины. Лопастей ветрового колеса могут описывать окружность с диаметром от нескольких метров до нескольких десятков, а частота их вращения может достигать 100 оборотов в минуту, а скорость на концах лопастей может превышать скорость ветра в несколько раз.

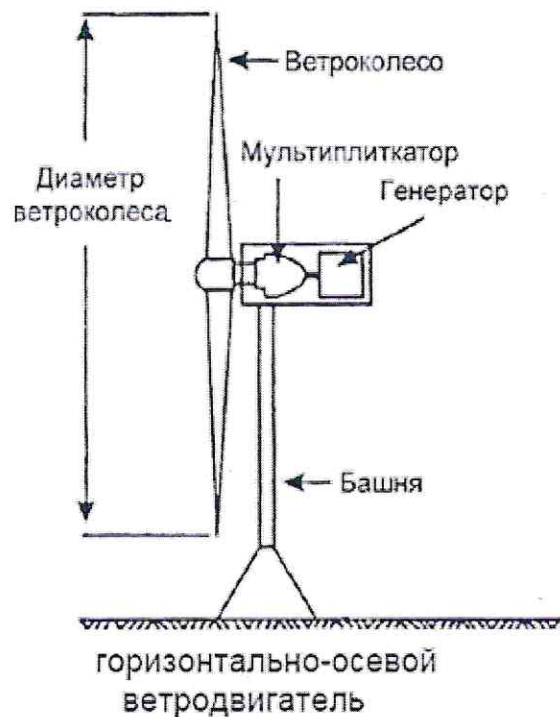


Рисунок 2.1 – Ветроэнергетическая установка с горизонтальным расположением ротора.

Ветроколесо связано с электрогенератором через мультипликатор, который служит для повышения частоты вращения вала ветроколеса и обеспечивает согласование с оборотами генератора. Корпус ветроэнергетической установки находится на специальной башне, которая представляет собой цилиндрическую или решетчатую конструкцию. Ветроэнергетическая установка должна иметь надежный фундамент, так как высота мощных ветроэнергетических установок может достигать 80 метров и больше.

Для защиты от поломок при сильных порывах ветра и ураганах почти все ВЭУ большой мощности автоматически останавливаются, если скорость ветра превышает предельную величину. Для целей обслуживания они должны оснащаться тормозным устройством. Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки имеют в своем составе устройство, обеспечивающее автоматическую ориентацию ветроколеса по направлению ветра.

В установках малой мощности мультипликатор может отсутствовать, так как в них используются специальные генераторы на постоянных магнитах.

Размер ветроэнергетических установок (ВЭУ) зависит от предполагаемой мощности ветроагрегата. Для использования его в сети ветроэнергетических установок потребуется мощность от 50 киловатт и выше, а в автономных ВЭУ используемая мощность ветроагрегата гораздо меньше – от нескольких сотен ватт до 10 киловатт. Этой мощности хватает для электроснабжения жилого дома. Такие ВЭУ должны быть укомплектованы мощными аккумуляторными батареями или дизель-генераторами, которые будут использоваться для обеспечения электроэнергией в безветренную погоду. Маломощные ветроэнергетические установки с мощностью менее 1 кВт могут быть использованы для заряда аккумуляторов и электроснабжения малой нагрузки (связь, освещение, электроинструмент и т.д.). Такие ветроэнергетические установки могут быть соединены с сетью и передавать вырабатываемую энергию в местную электросеть, или могут быть автономными, где потребитель находится в непосредственной близости от ветроагрегата.

При эксплуатации горизонтально-осевых ветроэнергетических установок было выявлено несколько недостатков. При резких сменах направления ветра горизонтально-осевые ветроэнергетические установки могут значительно уменьшать вырабатываемую электроэнергию. Этот процесс проиллюстрирован на рисунке 2.2.

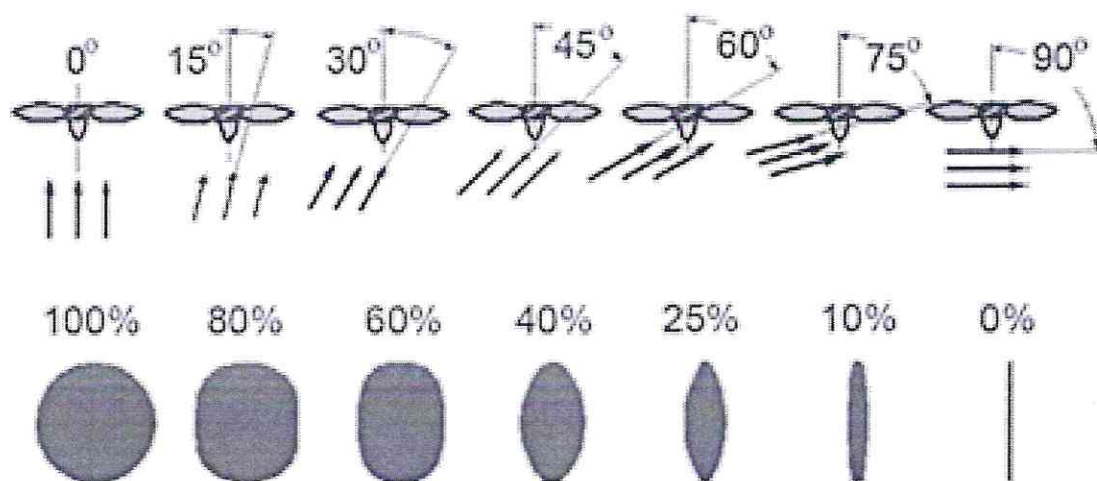


Рисунок 2.2 – Зависимость мощности вырабатываемой энергии турбиной от угла направления ветра.

Площадь ветроколеса будет уменьшаться при смене ветра, и этот процесс вызван большой инертностью устройства, обеспечивающего автоматическую ориентацию ветроколеса по направлению ветра у мощных ветроэнергетических установок.

Количество лопастей в ветроколесе может быть различным. Их форму и размеры рассчитывают в авиационных аэродинамических лабораториях. Количество лопастей может меняться от трех до восьми и более. Внешний вид лопастей представлен на рисунке 2.3

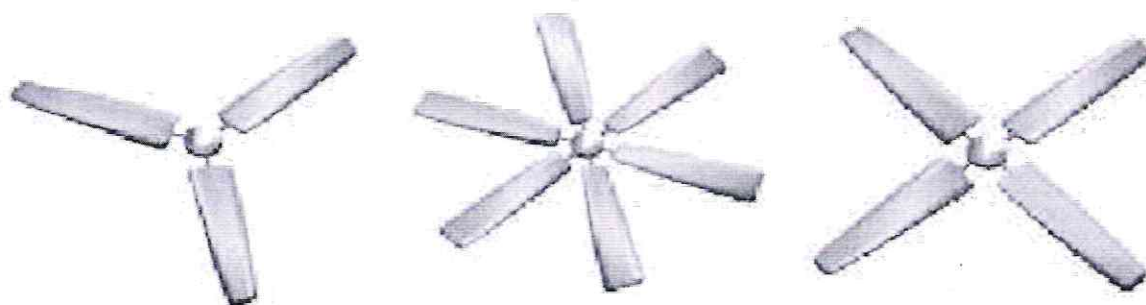


Рисунок 2.3 – Разновидности ветроколеса для ВЭУ с горизонтальной осью.

2.2. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения.

Вторым типом ветроэнергетических установок являются ветрогенераторы с вертикальной осью вращения.

Самым главным их преимуществом является возможность работать вне зависимости от направления ветра и ветроколесо не изменяет своего положения. Расчеты, проведенные учеными разных стран показали, что коэффициент использования энергии ветра у ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения ротора значительно выше, чем у ВЭУ с вертикальной осью вращения, но вертикальноосевые ВЭУ обладают рядом преимуществ. У таких

установок намного больше момент вращения и при увеличении скорости ветра они быстро наращивают силу тяги, после чего скорость вращения ветрового колеса стабилизируется. Это дает преимущество перед горизонтальноосевыми ВЭУ. Так как вертикальные ветроэнергетические установки не зависят от скорости ветра, их конструкция гораздо проще и меньше, чем у рассмотренных выше ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения ротора.

Вертикальные ВЭУ просты в эксплуатации, обладают саморегулированием скорости вращения в процессе работы и позволяют использовать редуктор без мультиплексора. Современные вертикально-осевые установки являются более эффективными, чем традиционные горизонтальноосевые, в тех регионах, где направление ветра постоянно меняется. Кроме того, благодаря особенности конструкции и практически полному отсутствию срыва потока с лопастей они не генерируют паразитные низкочастотные колебания, опасные для живых организмов. Тем не менее, к основному недостатку вертикально-осевых конструкций можно отнести наличие низкочастотных вибраций, возникающих за счет дисбаланса ротора, сложно устранимого современными техническими методами.

В отличие от горизонтально-осевых установок, имеющих горизонтальное положение вала ротора, который самостоятельно центрируется за счет сил тяжести, вертикально-осевому ротору при малейшем дисбалансе достаточно небольшое внешнее возмущение для появления вибраций, приводящих к целому ряду негативных явлений. Внешний вид вертикально-осевых ветроэнергетических установок представлен на рисунке 2.4. Так как ВЭУ с вертикальной осью являются установками малой и средней мощности и для использования в автономном энергопитании они вызывают определенный интерес. Себестоимость их производства меньше, чем у лопастных ветрогенераторов, а габариты позволяют устанавливать даже на крыше здания. Рассмотрим ветроэнергетические установки отечественного производства, что вызывает интерес в условиях санкций и импортозамещения.

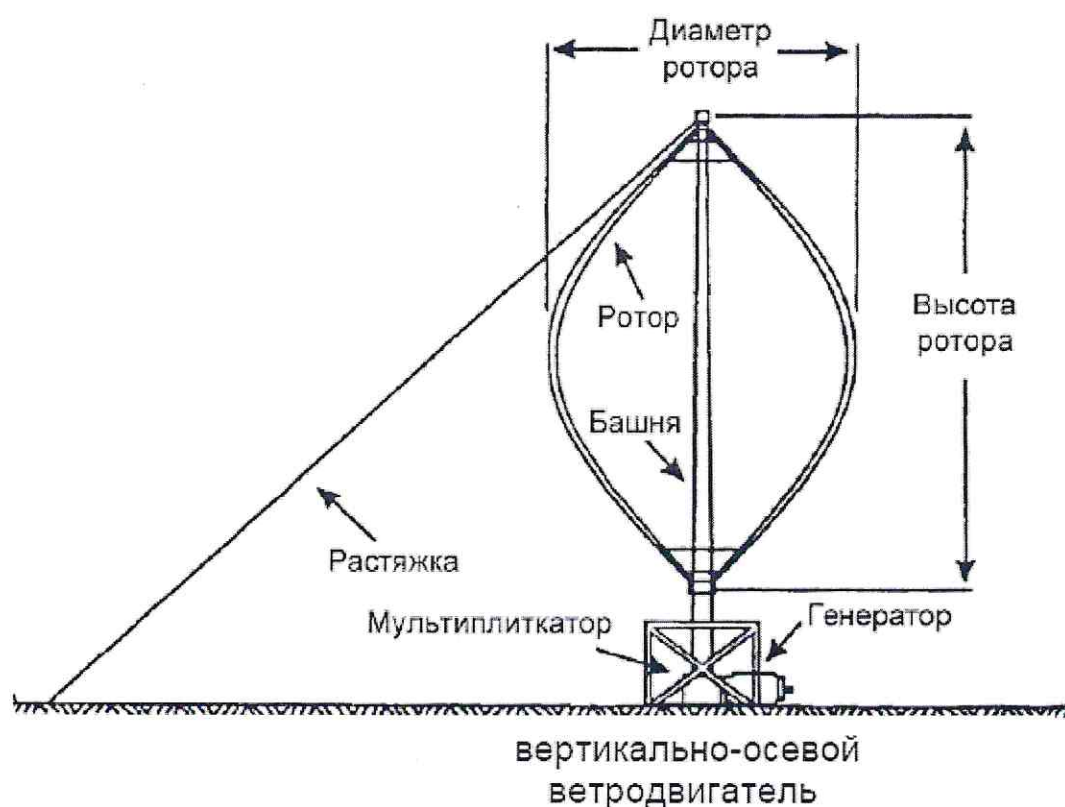


Рисунок 2.4 – Ветроэнергетическая установка с вертикальным расположением ротора

Как уже говорилось ранее, ветроколесо с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находится в рабочем положении. Эффективность работы вертикально-осевых ветроэнергетических установок принципиально не зависит от направления ветра, в связи с этим нет необходимости в механизмах и системах ориентации на ветер.

Теоретически доказано, что коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса горизонтальных пропеллерных и вертикально-осевых установок равен 0.6. К настоящему времени достигнутый на горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установках коэффициент использования энергии ветра составляет 0.48. Проведенные экспериментальные исследования российских вертикально-осевых установок показали, что достижение значения 0.4–0.45 – вполне реальная задача. Таким образом, коэффициенты использования энергии ветра горизонтально-осевых пропеллерных и вертикально-осевых ветроэнергетических установок по своим характеристикам стали очень близки.

Преимуществом вертикально-осевых ветроэнергетических установок является возможность размещения генератора и мультипликатора на фундаменте установки и исключения угловой передачи крутящего момента. Это позволяет отказаться от мощной, вероятнее всего многоступенчатой угловой передачи крутящего момента, упростив требования к монтажепригодности оборудования (исключить ограничения по габариту и массе) и к условиям эксплуатации (отсутствие толчков и вибраций). При размещении оборудования на фундаменте значительно улучшаются условия его монтажа и эксплуатации, упрощается передача вырабатываемой электроэнергии.

Сравнение рассмотренных типов ветроэнергетических установок позволяет заключить следующее. В горизонтально-осевых пропеллерных ветроэнергетических установках избегают вводить угловую передачу и размещают оборудование во вращающейся гондоле. При этом неизбежны сложности в связи с повышением требований к монтажепригодности оборудования, условиям его эксплуатации, а также при организации подъема оборудования и его эксплуатации в верхнем положении. Немало трудностей вызывает и передача электроэнергии от вращающегося вместе с гондолой генератора. Для того чтобы избежать скручивания силовой шины, необходимо ограничивать поворот гондолы, вводить коллекторную передачу либо отсоединять и раскручивать шину. Во всех этих случаях в конструкцию ветроэнергетической установки вводятся дополнительные устройства, усложняющие ее.

Передача крутящего момента на уровень фундамента связана с введением длинного трансмиссионного вала, однако обусловленное этим усложнение конструкции вполне компенсируется преимуществами нижнего размещения оборудования, даже в том случае, если вал будет послередукторным, то есть быстросходным. При доредукторном (тихоходном) исполнении длинный вал особых конструктивных усложнений не требует.

В горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установках удачно используются достижения авиационной техники, в частности в области проектирования лопастей, систем управления углами их установки, трансмиссий.

Следовательно, есть все основания полагать, что эти установки достаточно отработаны и их надежности может быть дана высокая оценка. Тем не менее, очевидно, что после отработки конструкции вертикально-осевые ветроэнергетические установки обещают более высокую надежность. Основаниями для такого вывода являются значительное упрощение их конструкции, снижение уровня требований к изготовлению трансмиссий, упрощение условий монтажа и эксплуатации.. Это обусловлено следующими особенностями вертикально-осевых установок: отсутствие механизмов и систем управления поворотом гондолы на ветер, размещение генератора и мультипликатора на фундаменте, отсутствие необходимости в устройствах и системах управления углом установки лопастей, отсутствие проблем с передачей электроэнергии от генератора.

Тихоходные вертикально-осевые ветроэнергетические установки, с точки зрения воздействия на окружающую среду, имеют следующие преимущества перед быстроходными горизонтальными пропеллерными:

- все уровни аэродинамических и инфразвуковых шумов гораздо ниже;
- меньше теле- и радиопомехи;
- меньше радиус разброса обломков лопастей в случае их разрушения и менее вероятно саморазрушение;
- ниже вероятность столкновения лопастей с птицами.

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки наиболее эффективны при малой (до 10кВт) мощности.

Рассмотрим наиболее совершенные типы вертикально-осевых ветроустановок.

2.2.1 Ротор Савониуса

Конструкция ротора Савониуса приведена на рисунке 1. Вращающий момент возникает при обтекании ротора Савониуса потоком воздуха за счет разного сопротивления выпуклой и вогнутой частей ротора Савониуса.

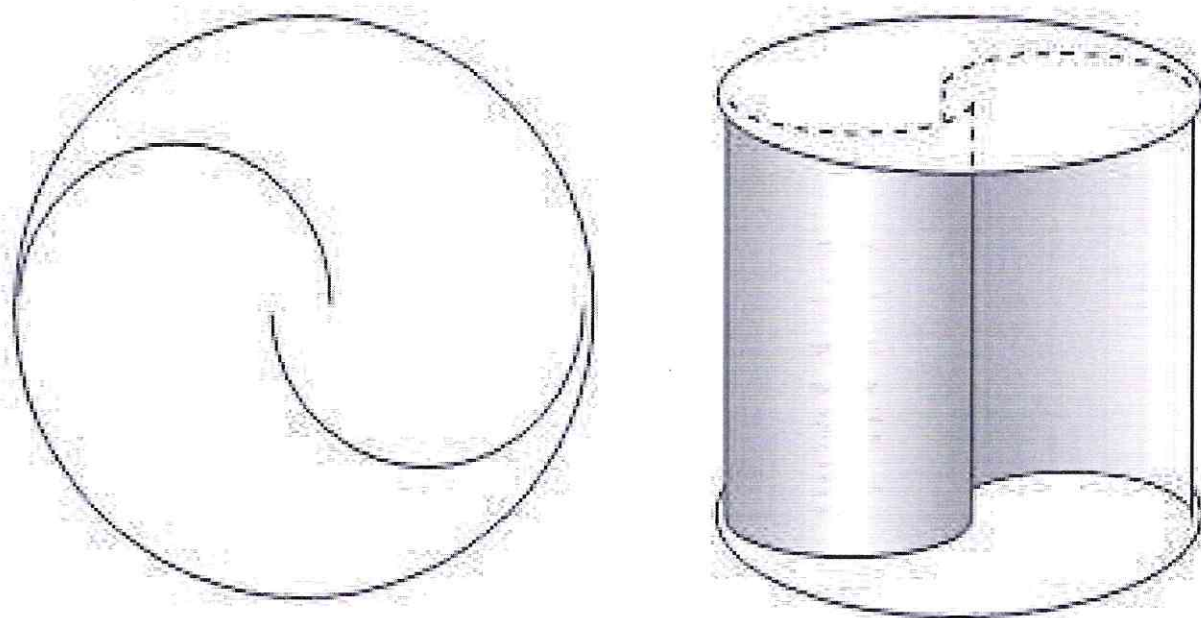


Рисунок1–Ротор Савониуса

Преимуществами ветроэнергетической установки этого типа являются низкий уровень шума, небольшая занимаемая площадь, отличная работа на малых ветрах (3–5 м/сек.). Поскольку это ротор с вертикальной осью вращения, то он не нуждается в устройствах ориентирования на ветер, что значительно упрощает конструкцию – ветроколесо отличается исключительной простотой. Однако эта турбина является самой тихоходной, и, как следствие, имеет очень низкий коэффициент использования энергии ветра.

2.2.2 Ротор Дарье

Ротор Дарье представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках (рис. 2).

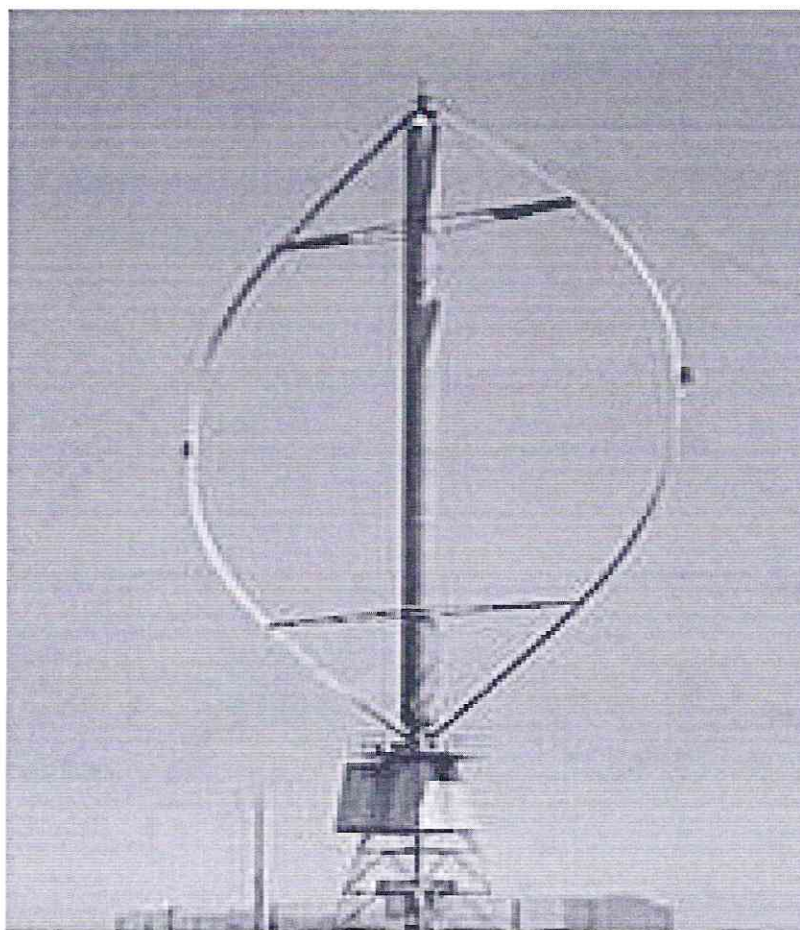


Рисунок 2 – Ротор Дарье

На каждое крыло, движущееся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скорости потока и мгновенной скорости крыла. Максимального значения подъемная сила достигает при ортогональности данных векторов. Ввиду того, что вектор мгновенной скорости крыла циклически изменяется в процессе вращения ротора, момент силы, развиваемый ротором, также является переменным. Поскольку для возникновения подъемной силы необходимо движение крыльев, ротор Дарье характеризуется плохим самозапуском. Самозапуск улучшается в случае применения трех и более лопастей, но и в этом случае требуется предварительный разгон ротора.

Ротор Дарье относится к ветроприемным устройствам, использующим подъемную силу, которая возникает на выгнутых лопастях, имеющих в поперечном сечении профиль крыла. Ротор имеет сравнительно небольшой началь-

ный момент, но большую быстроходность, в силу этого - относительно большую удельную мощность, отнесенную к его массе или стоимости.

Работа ротора Дарье не зависит от направления потока. Следовательно, турбина на его основе не требует устройства ориентации. Ротор Дарье характеризуется высоким коэффициентом быстроходности при малых скоростях потока и высоким коэффициентом использования энергии потока: площадь, ометаемая крыльями ротора, может быть достаточно большой. К недостаткам ротора Дарье относятся: плохой самозапуск, низкая механическая прочность, повышенный шум, создаваемый при работе.

Наиболее технологичным является Н-образный ротор Дарье (рис.3).

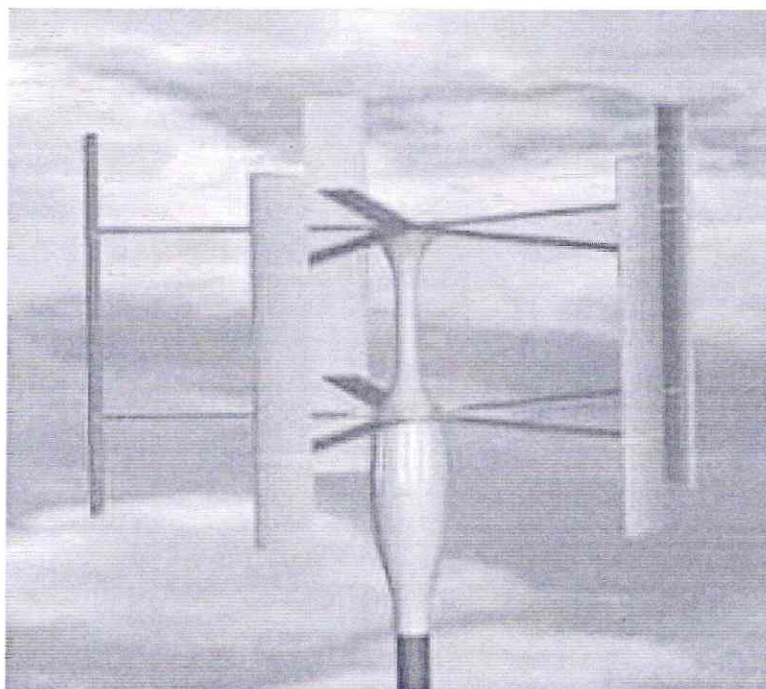


Рисунок 3.3—Ротор Н-Дарье

Ротор состоит из одной или более лопастей аэродинамического профиля. Установка такого типа является быстроходной (КПД достигает 0,38). Ротор Н-Дарье отличается пониженным уровнем шума и полным отсутствием инфразвука. Ветроэнергетическая установка этого типа имеет простую конструкцию и характеризуется высокой степенью надежности.

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки конструктивно являются более простыми и обладают еще рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми ветроустановками. Однако коэффициент использования мощ-

ности ветра и КПД у них пока еще несколько ниже, что приводит к увеличению габаритов, а в некоторых случаях и к увеличению материалоемкости. Вместе с тем при использовании вертикально-осевых ветроустановок в автономном режиме или в качестве резервных источников электроэнергии этот недостаток нивелируется. Это объясняется тем, что в автономном или резервном вариантах ветроэнергетические станции работают на нагрузку через аккумулятор, который работает в буферном режиме. Кроме того, в этом случае (буферное аккумулярование электроэнергии), можно снизить требования к качеству выходного напряжения и применить упрощенные конструктивные решения задач преобразования ветрового потока в механическую энергию вращения вала (например, нерегулируемые лопасти и т.п.). При этом требуемое качество электроэнергии в канале электроснабжения может быть обеспечено стандартными устройствами преобразования электрической энергии (например, источниками бесперебойного питания типа UPS) с аккумуляторной батареей соответствующей емкости.

3. Ветровой режим Ленинградской области

Для оценки ветрового режима в Ленинградской области рассмотрим результаты многолетних наблюдений за направлением и скоростью ветра у земли на пяти метеорологических станциях, расположенных на юге, севере, западе, востоке и в центре Ленинградской области.

3.1 Климат Ленинградской области

На северо-западе Российской Федерации находится Ленинградская область, которая входит в состав Северо-западного экономического района и является составной частью Северо-Западного федерального округа.

С севера область омывается водами Ладожского озера, с запада находится Финский залив. Эти два больших водоема являются местными климатообразующими факторами.

Ленинградская область располагается на равнинной территории Восточно-Европейской равнины, на которой имеются небольшие возвышенности, высота которых не превышает 150 метров над уровнем моря, и занимает территорию площадью почти 85 000 квадратных километров. Протяженность области с севера на юг составляет 320 километров, а с запада на восток почти 500 километров. На северо-западе области находится Карельский перешеек, на котором присутствует пересеченная местность со скалистым рельефом и множеством озер. На перешейке находится самая большая возвышенность – гора Кивисюръя, которая возвышается над уровнем моря на 205 метров.

Вдоль берегов Финского залива, Ладожского озера и в долинах крупных рек находятся низменности

Климат Ленинградской области можно отнести к морскому континентальному климату. Близость Атлантики с теплыми влажными воздушными массами, которые приходят на территорию области, приводит к тому, что лето на территории области теплое, иногда даже прохладное, а зимы не отличаются

большими морозами и сопровождаются частыми оттепелями. Зимой средние температуры наблюдаются в пределах $-9^{\circ}\text{C} \div -11^{\circ}\text{C}$, а средние температуры лета достигают $+17^{\circ}\text{C} \div +20^{\circ}\text{C}$. Самые экстремальные температуры наблюдались в районе города Тихвин, где летом была зафиксирована температура $+37,8^{\circ}\text{C}$ (28 июля 2010 г.), а зимой самая низкая температура по области – $-54,8^{\circ}\text{C}$ (16 января 1940 г.).

Самыми теплыми являются юго-западные территории области, а самыми холодными – восточные районы.

Количество осадков за год по области достигает 600-700 мм. Наибольшее количество осадков выпадает на возвышенностях, максимум - на Лемболовской высоте. Минимальное количество осадков выпадает на прибрежных низменностях. Наибольшее количество осадков выпадает летом и осенью.

Географическая карта области представлена на рисунке 3.1.

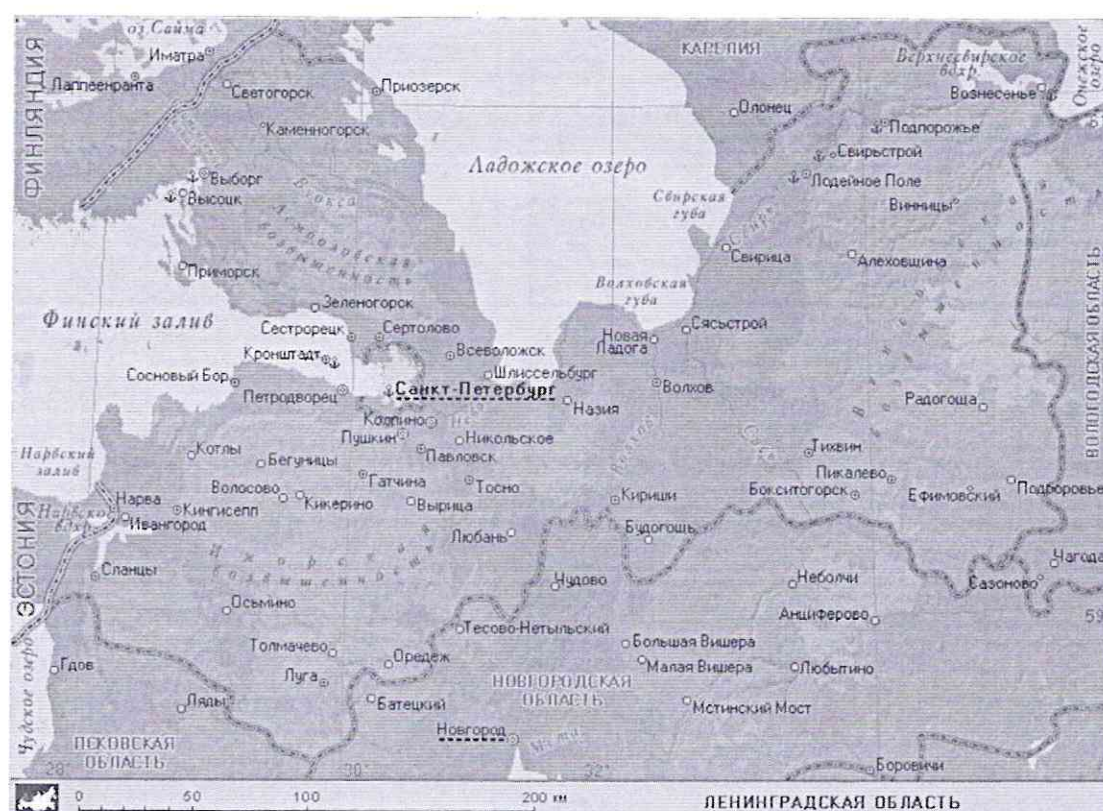


Рисунок 3.1 – Ленинградская область

В зимний период осадки выпадают в основном в виде снега. Постоянный снежный покров появляется после середины ноября – в начале декабря и держится до второй половины апреля.

Для изучения особенностей ветрового режима на территории области рассмотрим результаты многолетних метеорологических наблюдений на станциях Сланцы (запад области), Выборг (север), Лодейное Поле (восток) и Луга (юг области). Наблюдения проводились за пятилетний период, с 2020 по 2024 г.

3.2 Ветер на территории Ленинградской области

Особенности режима ветра в Ленинградской области для оценки ветро-энергетического потенциала начнем анализировать с северной части области и оценим результаты многолетних наблюдений за скоростью и направлением ветра.

3.2.1 Ветер в Выборге

Город Выборг находится на западе Карельского перешейка, в 175 километрах к северо-западу от Санкт-Петербурга

Район Выборга относится к районам с умеренным морским климатом. Основным климатообразующим фактором является общая циркуляция атмосферы, особенно перенос влажного воздуха с Атлантики. Самым активным этот перенос является в холодный период года, при наибольших температурных контрастах между сушей и морем. Увеличивается интенсивность прохождения циклонов, связанных с полярными и арктическими фронтами. В теплый период года атмосферная циркуляция становится менее интенсивной из-за уменьшения температурных контрастов, причиной которого становится увеличение притока солнечной радиации. Летом в формирование климата главное место занимает радиационный режим атмосферы.

Рассмотрим многолетний режим направления и скорости ветра в районе Выборга (таблица 3.1 и 3.2).

Таблица 3.1 – Средняя скорость ветра в Выборге (м/с)

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ср. скорость ветра, м/с	3.7	3.4	3.3	3.0	3.3	3.3	3.1	3.0	3.3	3.7	3.8	3.8

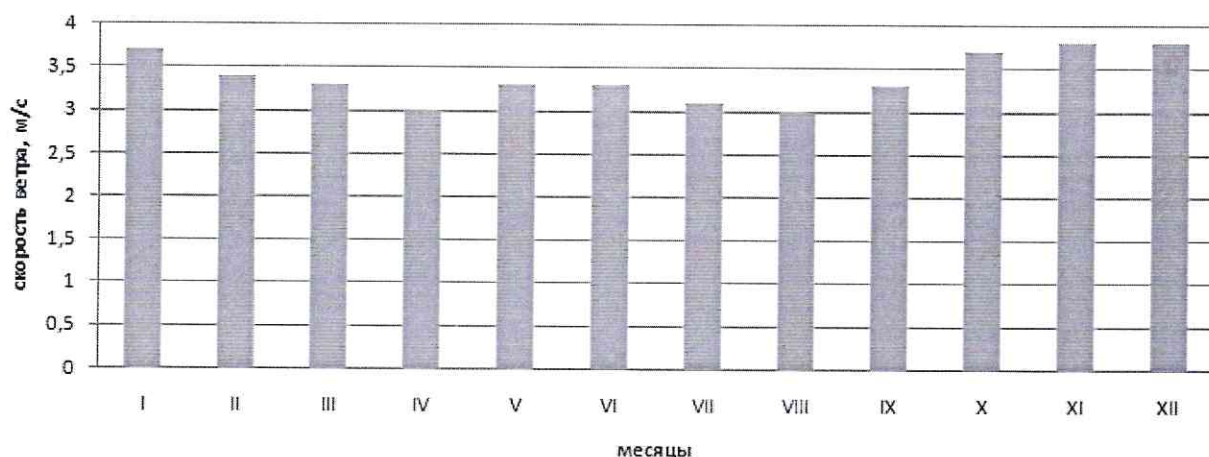


Рисунок 3.2 – Средняя скорость ветра в Выборге

Из графика на рисунке 3.2 видно, среднегодовая скорость ветра в Выборге не превышает 3,4 м/с, а максимальная скорость ветра наблюдается в зимние месяцы. Повторяемость направления ветра представлена в таблице 3.2 и на рисунке 3.3.

Таблица 3.2 – Повторяемость направления ветра (%)

направл.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
С	13	13	10	11	12	11	11	9	9	9	11	13	11
СВ	8	12	9	14	12	13	10	11	12	7	9	8	10
В	9	11	11	13	12	11	10	12	10	9	11	10	11
ЮВ	10	10	9	10	5	6	6	7	9	10	13	9	8
Ю	16	18	22	20	17	15	15	13	12	16	15	15	16
ЮЗ	19	18	22	19	24	23	26	22	19	20	17	19	22
З	14	9	7	5	8	9	11	13	14	17	14	14	11
СЗ	11	9	10	8	10	12	11	13	15	12	10	13	11
штиль	9	11	11	11	8	8	9	10	10	7	5	7	9

Анализ данных показал, что преобладающим направлением ветра является юго-западный, (22% случаев), а реже всего наблюдался ветер юго-восточных направлений. Это хорошо иллюстрирует график на рисунке 3.3.

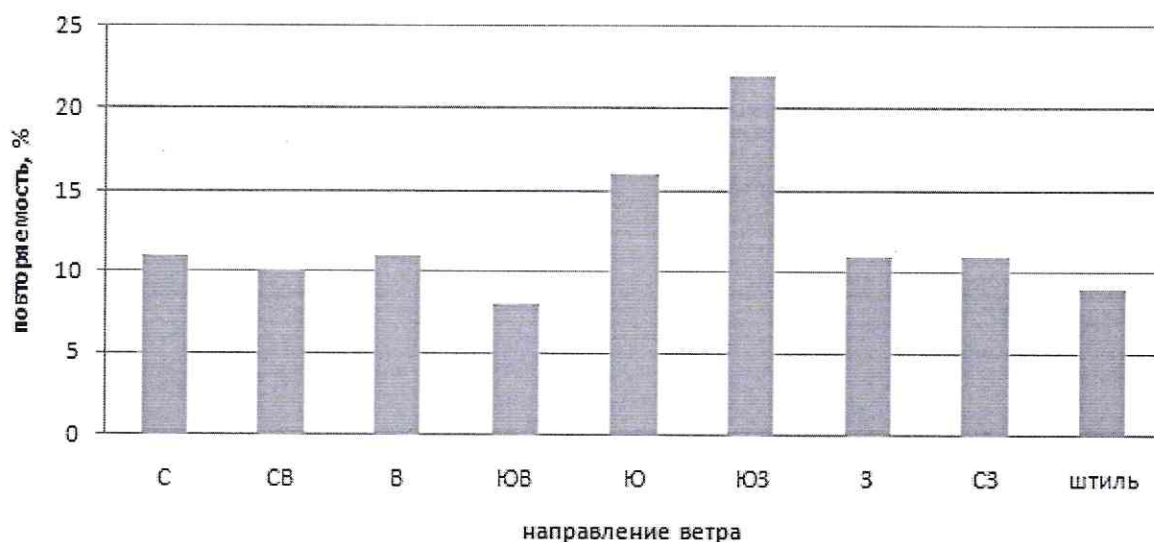


Рисунок 3.3 – Повторяемость направления ветра

Интерес вызывает и количество дней с сильным ветром в районе Выборга. Для оценки повторяемости скорости ветра выше 10 м/с, рассматривалось три градации скорости ветра – более 1м/с, более 15м/с и более 20 м/с. Результаты исследований приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Число дней с сильным ветром (Выборг).

месяц скорость	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
>10м/с	13	10	7	5	7	5	7	4	6	12	8	19
>15м/с	0	2	2	1	0	1	1	0	1	3	2	5
>20м/с	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Из таблицы видно, что ветер со скоростью более 20 м/с наблюдался за пятилетний период наблюдений всего 2 дня, а число дней ветром более 10 м/с больше всего наблюдалось в зимний холодный период года, что хорошо иллюстрирует график на рисунке 3.4. Больше всего дней с сильным ветром наблюдалось в декабре, январе и октябре. В летний период количество дней с сильным ветром уменьшается. Всего за рассматриваемый период было 103 дня с ветром более 10 м/с, и 18 дней со скоростью больше 15 м/с.

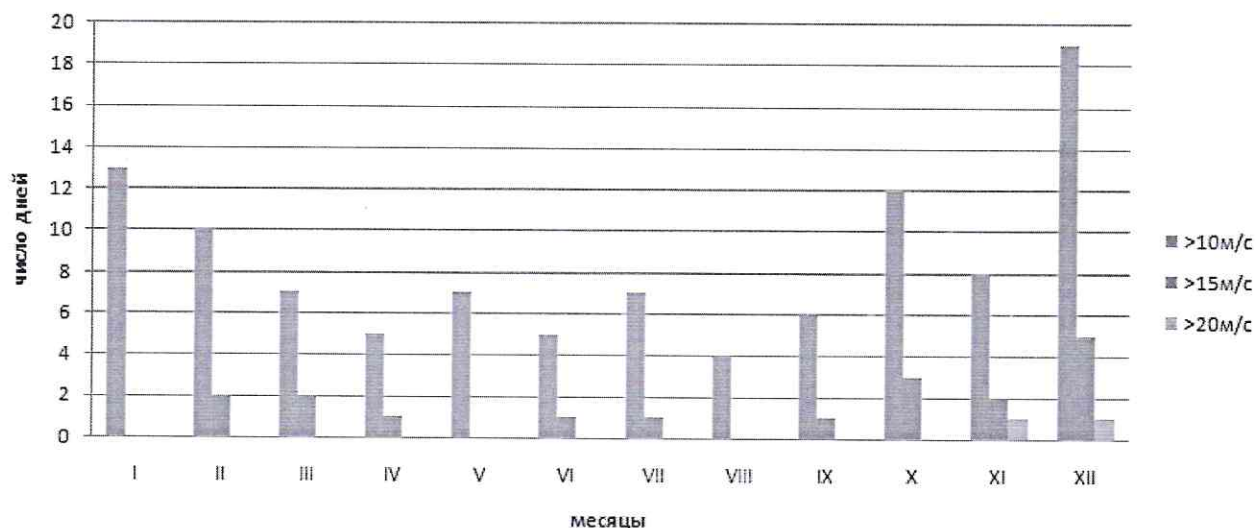


Рисунок 3.4 – Число дней с сильным ветром

Ранее говорилось, что одним из требований для установки мощных ветроэнергетических установок была среднегодовая скорость ветра в районе установки должна быть не менее 5,5 м/с. В результате исследования выяснилось, что установка больших полей мощных ВЭУ в районе города Выборг нерентабельна. Но для установки менее мощных ВЭУ есть ветровые условия.

3.2.2 Ветер в городе Сланцы.

На западе Ленинградской области находится город Сланцы. Он расположен на равнинной, заболоченной местности, покрытой лесом. В районе города встречаются небольшие возвышенности с высотой до 50 метров. Реки, протекающие в районе города, имеют крутые обрывистые берега, а к западу от города, на расстоянии 20 километров находится Чудское озеро с низким песчаным берегом. В начале декабря озеро замерзает и до наступления марта толщина льда увеличивается до 80-90 см. Лед исчезает в конце апреля.

Большое количество водоемов, Чудское озеро и Финский залив являются местными физико-географическими условиями, влияющими на погоду. На по-

годные условия большое влияние имеет западный перенос воздушных масс с Атлантики и повышенная циклоническая деятельность, сказывается и влияние Гольфстрима.

Рассматриваемая территория расположена в пределах умеренной климатической зоны. По характеру годовой изменчивости климатических параметров данный район относится к морскому типу климата.

Рассмотрим характеристики ветра в районе города Сланцы.

В таблице 3.4 и 3.5 представлена средняя скорость и направление ветра за пятилетний период наблюдений.

Таблица 3.4 – Средняя скорость ветра в Сланцах (м/с).

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
скорость	2,6	2,5	2,4	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,9	2,4	2,6	2,6	2,3

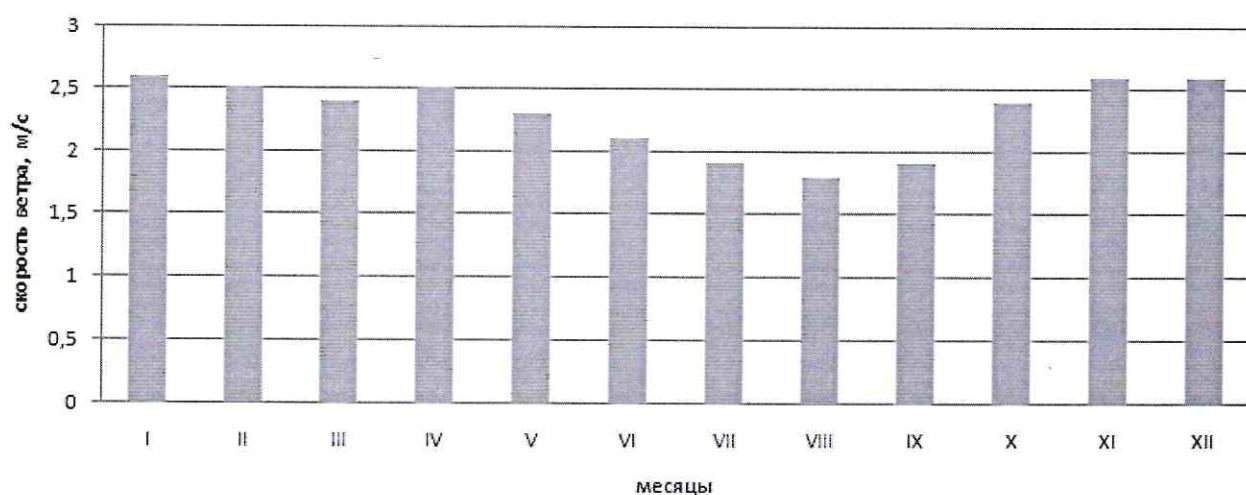


Рисунок 3.5 – Средняя скорость ветра в городе Сланцы

Из графика видно, что средняя годовая скорость ветра не превышает 2,3 м/с, и чаще всего более сильный ветер наблюдается в холодный период года

Повторяемость направлений ветра представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Повторяемость (%) направлений ветра в районе города Сланцы.

направл.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
С	6	7	7	10	13	13	13	9	10	7	7	6	9
СВ	4	5	4	8	8	9	7	7	7	4	5	3	6
В	9	11	12	14	13	11	10	13	10	8	11	10	11
ЮВ	19	21	21	18	13	12	12	13	17	19	22	21	17
Ю	19	18	16	12	10	11	16	15	17	21	22	21	17
ЮЗ	19	15	15	12	11	12	13	15	16	19	15	18	15
З	13	12	13	13	14	15	14	15	13	13	10	11	13
СЗ	11	11	12	13	18	17	15	13	10	9	8	10	12
штиль	6	6	8	7	8	9	11	13	11	6	4	5	8

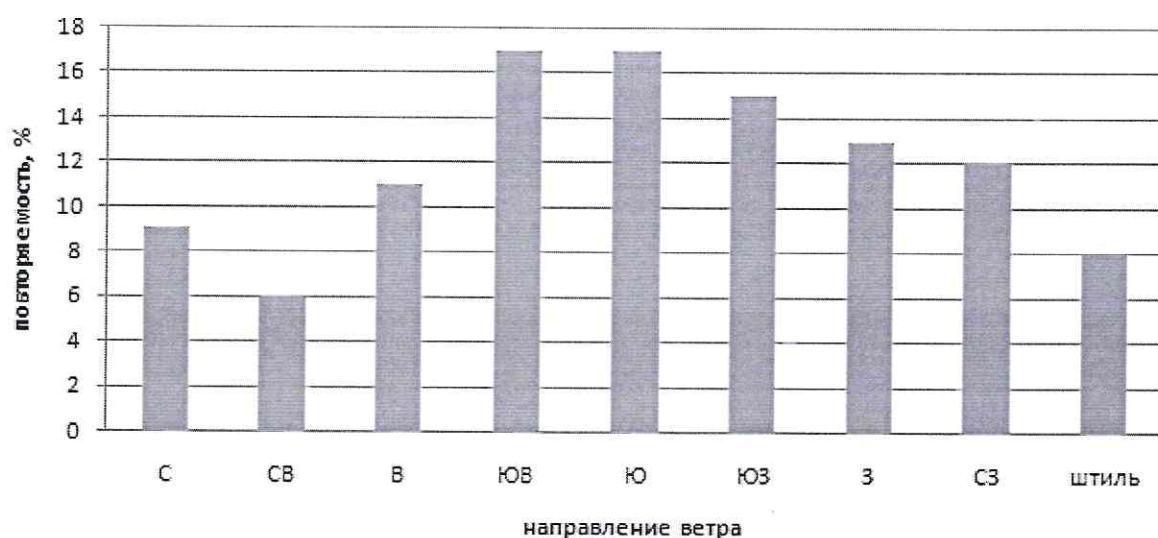


Рисунок 3.6 – Повторяемость направлений ветра в Сланцах.

Из графика видно, что в районе города Сланцы преобладают ветра южного и юго-восточного направления, а меньше всего повторяемость северо-восточного ветра.

Рассмотрим число дней сильного ветра установленных градаций. Результаты исследования представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Число дней с сильным ветром (Сланцы)

месяц скорость	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
>10м/с	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	6	6
>15м/с	3	3	2	3	4	4	2	2	4	4	6	6
>20м/с	1	1	0,8	2	2	2	1	1	2	1	1	1

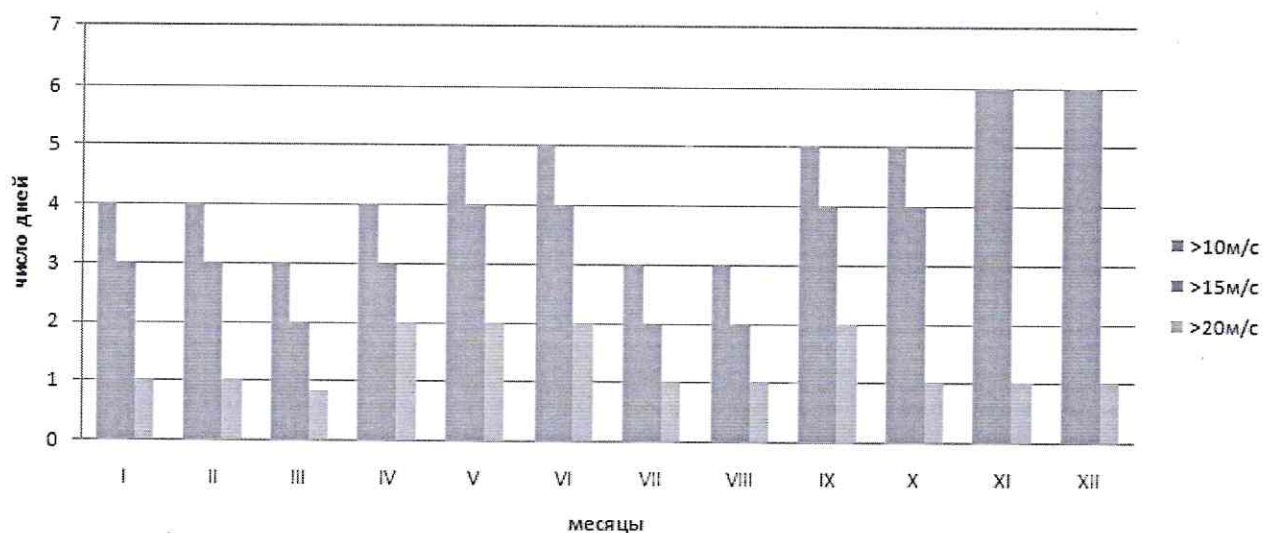


Рисунок 3.7 – Количество дней с сильным ветром.

В Сланцах количество дней с ветром, скорость которого превышает 10 м/с, больше всего наблюдалось в холодный период года и в начале лета. В зимнем сезоне преобладающими являются ветры южного и юго-западного направлений. Ветры со скоростью более 15 м/с редки и по времени и не продолжительны. Этому способствует циклоническая деятельность на Полярном фронте и вторжение антициклонов с юго-запада, а также местные географические условия. Основной циркуляционной особенностью в начале лета остается преобладание циклонической деятельности в системе западно-восточного переноса воздуха с более или менее регулярными нарушениями этого переноса, то есть переходом к меридиональным потокам на высотах. Все эти процессы вызывают усиление ветра.

Но значения среднегодовой скорости ветра также показывают, что мощные ветроэнергетические установки устанавливать на западе области не стоит,

а следует обратить внимание на маломощные ветровые генераторы для мелких хозяйств.

3.2.3 Ветер в Лодейном Поле.

На востоке Ленинградской области находится город Лодейное Поле, который находится на Ладожско-Онежском перешейке. Местность в районе города покрыта большим количеством мелких рек и озер и сильно заболоченная. На территории наблюдаются многочисленные пологие холмы с высотой до 15 метров и скалистые гряды с высотой до 25 метров, которые чередуются с болотами в низинах. В районе города находится Олонецкая возвышенность с высотой до 240 метров, и отроги Вепсовской возвышенности, которая представляет собой скалистые гряды различных размеров и многочисленные холмы.

Как и вся область, район города Лодейное Поле относится к районам с умеренным морским климатом. Основным климатообразующим фактором является общая циркуляция атмосферы, которая обуславливает неустойчивую погоду с резкими изменениями. Циклоническая деятельность усиливается в зимний период на арктическом и полярном фронтах и преобладающей воздушной массой в районе аэродрома является морской арктический и морской умеренный воздух.

Весной наблюдается процесс перестройки циркуляции атмосферы, которая со временем приобретает черты, присущие летним месяцам. Циклоническая деятельность ослабевает, и все чаще появляются антициклоны, формирующиеся в массах арктического воздуха

Для осени характерно усиление меридиональной циркуляции, которая приводит к глубоким вторжениям холодного воздуха на юг и к выходу теплого воздуха в более высокие широты. Это зачастую вызывает резкую смену режима погоды. Арктический и полярный фронты все чаще опускаются к югу, а циклоническая деятельность на них, усиливаясь, приводит к более частому ухудше-

нию погоды. Большую роль в формировании погодных условий, особенно к концу осени, имеют Ладожское и Онежское озера.

Рассмотрим показатели ветра для района города Лодейное поле. Средняя скорость ветра представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Средняя скорость ветра в районе города Лодейное поле

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
скорость	3.1	3.1	3.1	2.9	2.8	2.5	2.2	2.3	2.5	3.0	3.1	3.1	2.8

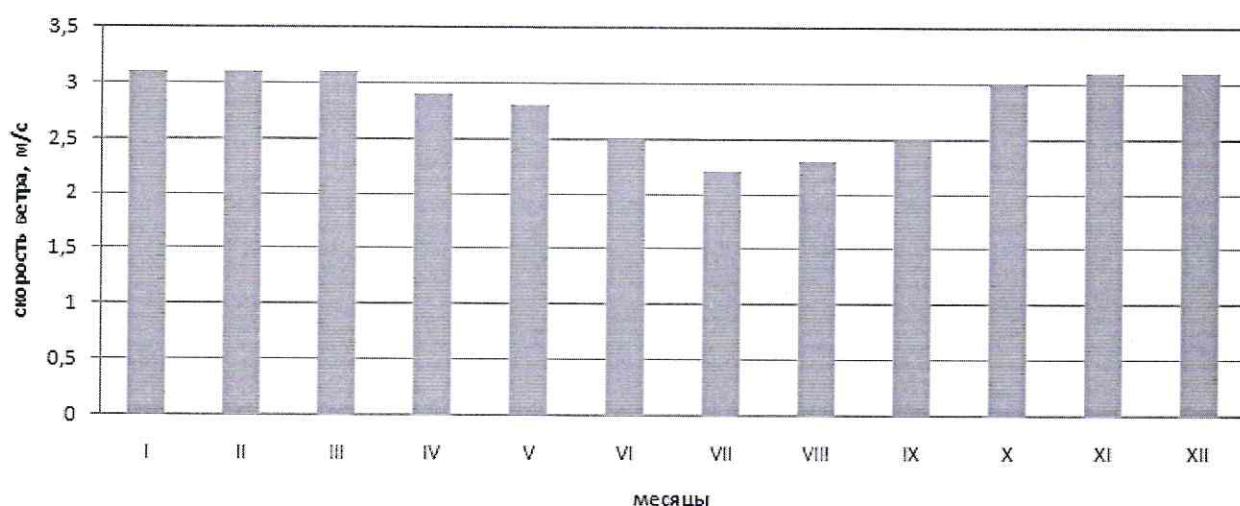


Рисунок 3.8 – Средняя скорость ветра в Лодейном Поле.

Из графика на рисунке 3.8 видно, что средняя скорость ветра за год не превышает 3,1%, а ветер сильнее холодный период, что повторяет картину на рассмотренных ранее территориях. Повторяемость направления ветра представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Повторяемость (%) направлений ветра в Лодейном Поле

направл.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
С	4	5	5	8	10	10	9	10	7	5	6	4	7
СВ	3	3	4	9	9	11	8	7	6	4	4	3	6
В	11	14	17	21	22	22	18	16	12	6	6	7	14
ЮВ	10	8	8	6	6	6	7	7	6	7	11	9	8
Ю	11	11	12	10	6	6	9	8	10	14	14	13	10
ЮЗ	23	23	25	21	19	20	22	24	26	29	25	27	24
З	30	28	22	17	19	17	18	20	25	28	26	30	23
СЗ	8	8	7	8	9	8	9	8	8	7	8	7	8
штиль	7	6	5	5	5	6	7	7	5	4	5	7	6

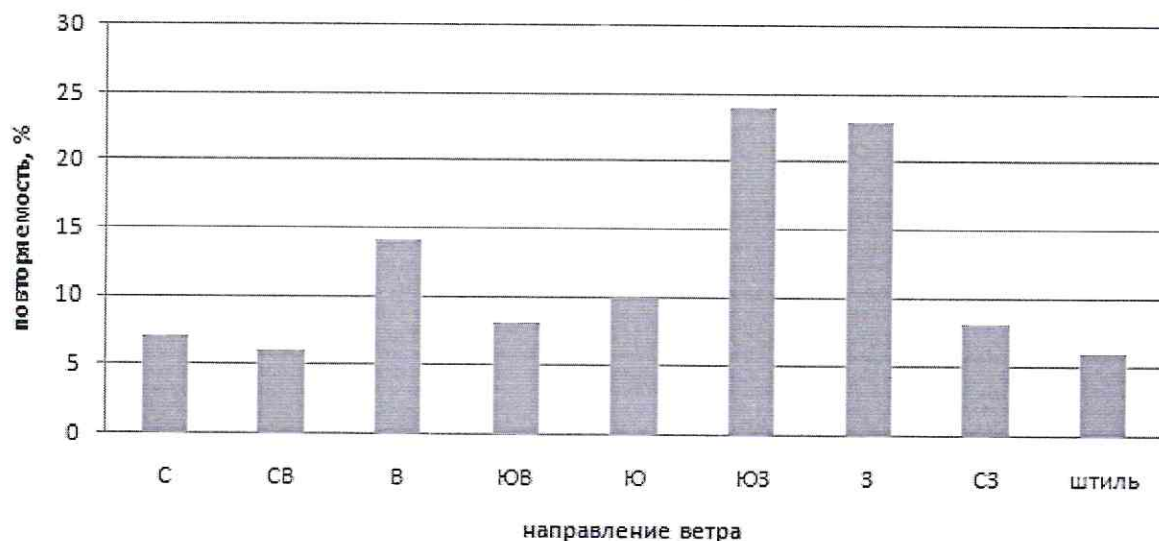


Рисунок 3.9 – Направление ветра в Лодейном Поле.

Анализ графика показывает, что чаще всего в Лодейном Поле наблюдался ветер юго-восточного и западного направлений, реже всего – северо-восточного направления.

Рассмотрим число дней с сильным ветром в районе города. Результаты исследования представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Число дней с сильным ветром (Лодейное Поле)

месяц скорость	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
>10м/с	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	6	6
>15м/с	3	3	2	3	4	4	2	2	4	4	6	6
>20м/с	1	1	0,8	2	2	2	1	1	2	1	1	1

Анализ таблицы и графика на рисунке 3.10 показал, что Лодейном поле количество дней с сильным ветром меньше, чем на западе и севере Ленинградской области и ветер более 10 м/с наблюдался чаще всего в январе месяце – 5 дней, а меньше всего в мае – 2 дня.

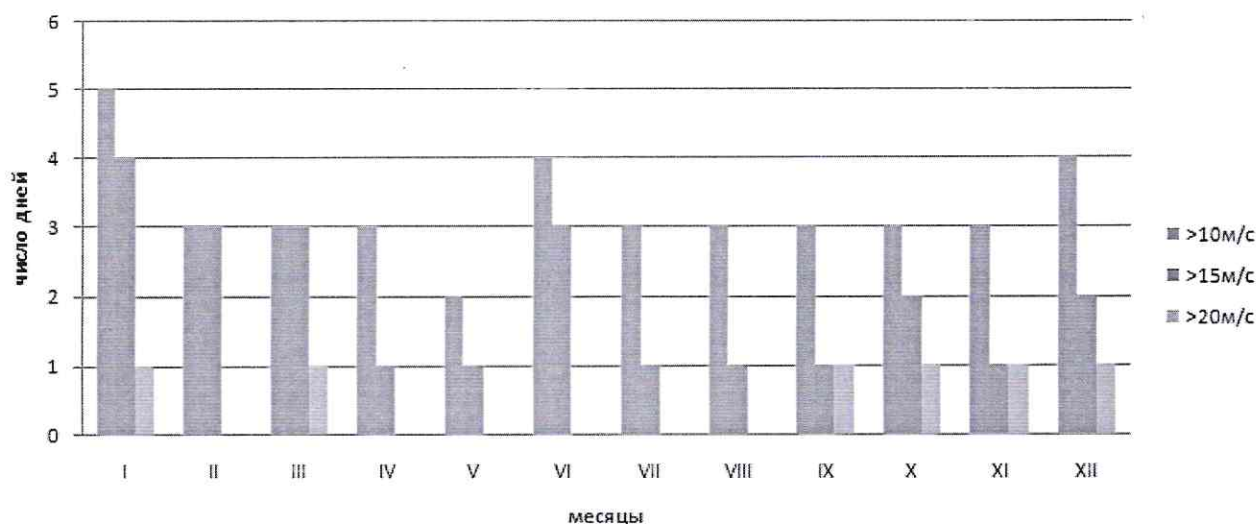


Рисунок 3.10 – Количество дней с сильным ветром.

Таким образом можно сделать вывод, что и на востоке области нет подходящих условий для эксплуатации мощных ветроэнергетических установок.

3.2.4. Ветер в городе Луга

Самым южным городом Ленинградской области является Луга, который находится в 175 километрах к юго-западу от Санкт-Петербурга

Климат района города отличается от климата области своей увеличенной континентальностью. Преобладающая циркуляция атмосферы западная, которая летом сменяется на меридиональную циркуляцию воздушных масс, а осенью – на восточную. Циклоны активны в зимний период, а характер погоды определяет глубокая ложбина Исландской депрессии.

Также необходимо добавить, что вся циклоническая деятельность в районе связана с атмосферными фронтами. Наиболее часто фронты, проходящие над районом Луги в зимнее время, сопровождаются низкой облачностью и ограниченной видимостью, а также выпадением обложных осадков.

Весенние синоптические процессы в значительной мере определяются характером зимней циркуляции. Западная циркуляция, преобладающая зимой, весной преобразуется в восточную. Этот процесс обуславливает резкое развитие весенних явлений (вскрытие рек, переход температуры через 0° и др.).

При переходе зимней восточной циркуляции в меридиональную циркуляцию уже в конце весны наблюдается вторжение континентального воздуха. Рассмотрим режим ветра в районе города Луги

В таблице 3.10 представлена средняя скорость ветра в районе города Луга. Данные таблицы проиллюстрированы на графике (рас.3.11)

Таблица 3.10 – Средняя скорость ветра (м/с) в районе города Луга

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
скорость	2.9	2.6	2.5	2.5	2.3	2.2	1.9	1.9	2.0	2.5	2.7	2.7	2.4

Из таблицы видно, что средняя скорость ветра не превышает 2,9 м/с, максимум наблюдается в январе. Повторяемость направления ветра представлена в таблице 3.11.

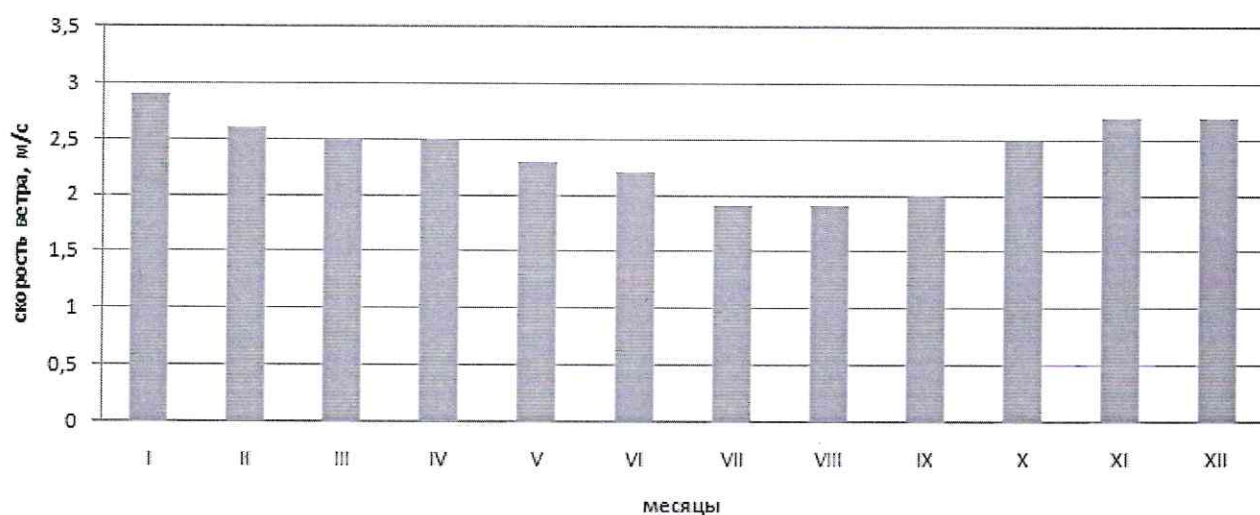


Рисунок 3.11 – Повторяемость скорости ветра в Луге

Из графика видно, что самая высокая является средняя скорость января, ноября и декабря.

Максимальная скорость ветра представлена в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Число дней с сильным ветром заданных градаций.

месяц скорость	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
>10м/с	5	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3
>15м/с	4	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	2
>20м/с	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

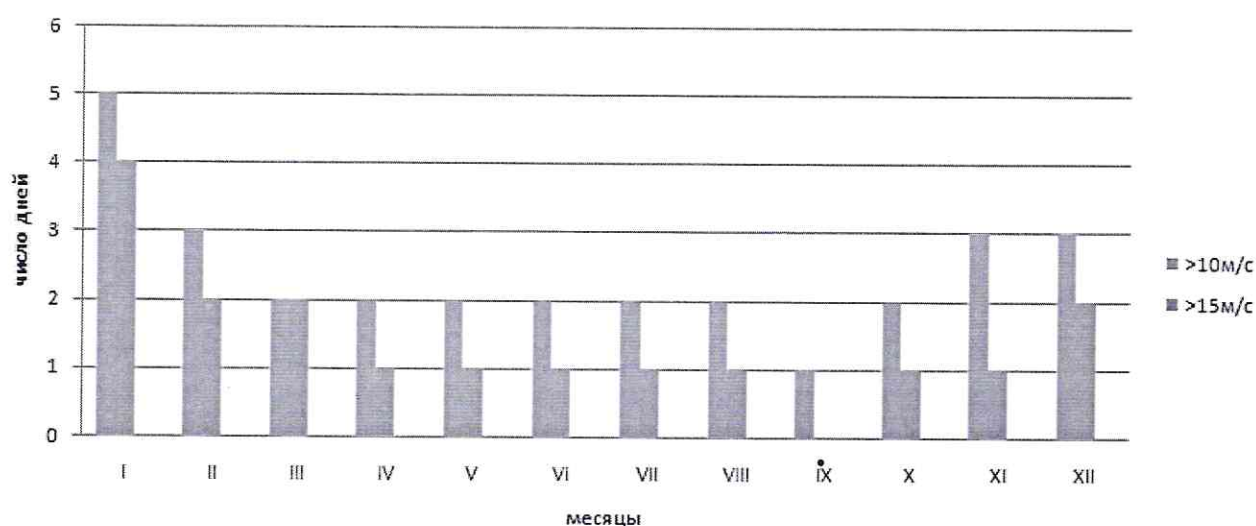


Рисунок 3.12 – Сильный ветер в Луге

Из таблицы и графика видно, что в Луге наблюдается наименьшее по всей Ленинградской области количество дней с ветров более 10 м/с.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что практически вся территория Ленинградской области является нерентабельной для установки больших полей мощных ветроэнергетических установок, для устойчивой работы которых необходим ветер со средней годовой скоростью более 5,5 м/с.

В Ленинградской области, где средняя годовая скорость ветра не превышает 3,5 м/с, применение мощных мегаваттных ветроэнергетических станций



Рисунок 3.13 – ВЭУ мощностью 1- кВт

экономически нецелесообразно, а вот на малые и средние ВЭУ стоит обратить пристальное внимание, особенно на то оборудование, которое начинают производить в нашей стране.

Заключение.

Приоритетным направлением развития ветроэнергетики в России на ближайшее время будет автономное использование малых и средних ветроэнергетических установок в отдаленных регионах Крайнего Севера, т.к. там сосредоточены основные ветроэнергетические ресурсы страны, низкая плотность населения, отсутствуют крупные электрические сети и имеется около 17 тыс. малых населенных пунктов, где целесообразно использовать ВЭС для целей энергоснабжения.

В Ленинградской области, где средняя годовая скорость ветра не превышает 3,5 м/с, применение мощных мегаваттных ветроэнергетических станций экономически нецелесообразно, а вот на малые и средние ВЭУ стоит обратить пристальное внимание, особенно на то оборудование, которое начинают производить в нашей стране.

Как и любая автономная система, ветроэлектрические установки малой и средней мощности должны работать независимо от сети централизованного энергоснабжения и в качестве дублера на случай безветренной погоды должны работать в сочетании с другими энергетическими установками в качестве компонента комбинированной системы энергоснабжения.

Очевидно, что ключевым фактором, определяющим выбор между применением автономной энергетической системы и проведением линий электропередачи (ЛЭП) от объекта к сетям централизованного энергоснабжения, является конкурентоспособность стоимостных характеристик ВЭУ в сравнении со стоимостью подключения к постоянной электросети.

Ветроэнергетические установки в Ленинградской области целесообразно устанавливать в прибрежных районах больших водоемов, так как в таких районах присутствуют суточные колебания скорости ветра.

Список литературы

1. Пособие по синоптической метеорологии / Ю. В. Ефимова, О. Н. Топтунова, И. А. Иванова [и др.] ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2022. – 94 с.
2. Дашко Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии. – Владивосток: ДВГУ, 2005.
- 3 Власов В.К. Ветроэнергетические установки. – Москва: Инфра-Инженерия, 2022г. -316 с.
4. Марьяндышев, П. А. Ветроэнергетические установки и перспективы их использования в Арктической зоне РФ : учебное пособие / П. А. Марьяндышев. — Архангельск : САФУ, 2018. — 68 с.
5. Шелехов. И.Ю., Рупосов В.Л. Альтернативные и нетрадиционные источники энергии: учебное пособие.- Иркутск: ИРНИИТУ, 2020 – 160с.
6. Климатический справочник СССР, выпуск 21, часть 2,4,5 – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978.
7. Расписание погоды rp5 [Электронный ресурс]; Режим доступа: <https://rp5.ru/> , свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.