



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: «Учет динамики параметров ветра при расчете ветровых
электродвигателей»

Исполнитель

Головач Даниил Геннадьевич

(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)

« 5 » Июня 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА В НОРИЛЬСКЕ	5
1.1 Исторический обзор ветровых данных в Норильске	5
1.2 Вариабельность параметров ветра в разные временные периоды.....	8
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА	26
2.1 Методы сбора и обработки данных о ветре	26
2.2 Моделирование экстремальных ветровых событий с использованием численных методов	27
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА НА РАБОТУ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ.....	33
3.1 Анализ конструкций ветрогенераторов	33
3.2 Расчет потенциальной мощности ветрогенераторов разных типов	46
ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОТРАСИ.....	64
4.1 Потенциальное воздействие на конструкцию ветроустановок	64
4.2 Ключевые характеристики важные для проектирования и эксплуатации ветроустановок	66
4.3 Перспективы дальнейших исследований	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	70

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, вопросы экологии и энергии становятся все более актуальными, использование возобновляемых источников энергии становится неотъемлемой частью стратегии развития многих регионов. Ветровые электрогенераторы являются одним из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии, и их эффективность зависит от параметров ветра.

Однако, при проектировании ветровых электрогенераторов, особенно для регионов с сложными климатическими условиями, необходимо учитывать особенности параметров ветра в данных регионах. Один из таких регионов является Норильск – город на севере Красноярского края, расположенный в условиях арктического климата. В связи с этим, в данной работе будет рассмотрен учет динамики параметров ветра для Норильска.

Целью данной работы является проведение детального анализа ветровых условий в районе Норильска для определения потенциала использования ветроэнергии и выявления экстремальных ветровых событий, которые могут повлиять на конструкцию и эксплуатацию ветроустановок. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

Сбор и обработка данных о скорости и направлении ветра:

- Использование данных ERA5, предоставленных Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), для получения информации о ветровых условиях на высоте 100 метров над уровнем земли за период с 1992 по 2022 годы.
- Преобразование данных в удобный для анализа формат с использованием библиотек `numpy` и `pandas`.

Анализ временных и пространственных характеристик ветровых условий:

- Проведение временного анализа ветровых условий, включающего почасовой, дневной и сезонный анализ.
- Выполнение пространственного анализа для выявления распределения средней скорости и направления ветра в регионе Норильска.

Идентификация и анализ экстремальных ветровых событий:

- Определение порогового значения для экстремальных ветровых событий на основе 95-го перцентиля скорости ветра.
- Идентификация экстремальных ветровых событий и анализ их продолжительности и интенсивности.
- Пространственное распределение экстремальных ветровых событий для выявления наиболее уязвимых зон.

Формулирование рекомендаций по проектированию ветроустановок для условий Норильска:

- Анализ потенциального воздействия экстремальных ветровых событий на конструкцию ветроустановок.
- Разработка рекомендаций по характеристикам ветроустановок, включая проектные скорости ветра, требования к прочности конструкции, системы торможения и мониторинга.

Таким образом, данная работа имеет целью изучить и проанализировать динамику параметров ветра в Норильске, а также разработать рекомендации по учету данной динамики при проектировании ветровых электрогенераторов для данного региона. Проведение данного исследования и разработка рекомендаций могут способствовать повышению эффективности использования ветровых электрогенераторов в Норильске и других регионах с аналогичными климатическими условиями.

В работе "Учет динамики параметров ветра при расчете ветровых электрогенераторов" объектом исследования является ветровой электрогенератор, который представляет собой устройство, преобразующее кинетическую энергию ветра в электрическую энергию. Предметом исследования являются параметры ветра, такие как скорость ветра, его направление и частота изменения, которые имеют важное значение при расчете эффективности работы ветрового электрогенератора. Также в работе будет проведен анализ данных о характеристиках ветра, взятых из открытых источников. В работе проводится анализ динамики этих параметров в Норильске, что позволяет определить оптимальные параметры для проектирования и эксплуатации ветровых электрогенераторов в данном регионе.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА В НОРИЛЬСКЕ

1.1 Исторический обзор ветровых данных в Норильске

Ветроэнергетика является одним из наиболее эффективных и экологически чистых способов получения электроэнергии. Ветровые электрогенераторы, использующие энергию ветра для преобразования его в электричество, становятся все более популярными в различных регионах мира. Однако перед разработкой и установкой ветровых электрогенераторов необходимо провести анализ динамики параметров ветра в конкретной локации, чтобы определить потенциал использования ветровой энергии.

В данной работе рассматривается учет динамики параметров ветра при расчете ветровых электрогенераторов для города Норильск. Норильск расположен в Красноярском крае, вблизи северного полярного круга, что делает его особенно интересным объектом для исследования ветровых условий [2].

Данный город находится в IV зоне по давлению ветра, что соответствует среднегодовой скорости ветра составляет более 6 м/сек (рисунок 1).

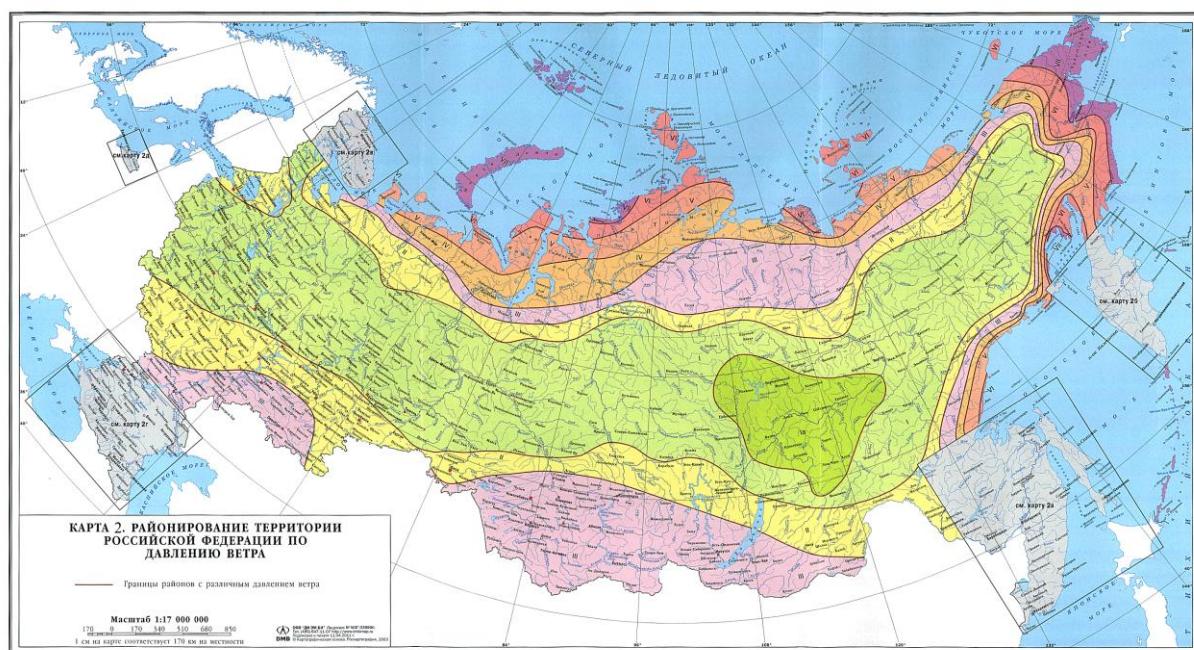


Рисунок 1 – Карта-схема районирования территории РФ

1.1.1 Исторический обзор ветровых данных в Норильске

Для проведения анализа динамики параметров ветра в Норильске необходимо обратиться к архивным данным, которые были собраны в течение длительного периода времени. Ветровые данные, такие как скорость и направление ветра, могут быть получены с помощью метеорологических станций, расположенных в разных частях города. [16]

Первые метеорологические станции в Норильске были установлены в середине XX века. Они предоставляли основные данные о погоде, включая параметры ветра. В то время наблюдения проводились вручную, и из-за погрешности измерений в следствие страдала точность и надежность полученных данных.

С развитием технологий и автоматизации метеорологических наблюдений в Норильске были установлены современные метеорологические станции, оснащенные специальными датчиками и приборами. Эти станции позволяют собирать данные о погоде в режиме реального времени. Ветровые данные, полученные с помощью таких

станций, более точны и надежны, что позволяет проводить более детальный анализ динамики параметров ветра в Норильске.

Для проведения данного исследования использовались данные ERA5, предоставленные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). ERA5 представляет собой глобальный реанализ данных о климате, охватывающий период с 1940 года по настоящее время. Данные ERA5 включают широкий спектр метеорологических параметров, таких как температура, осадки, давление, скорость и направление ветра, и предоставляются с высокой временной и пространственной разрешающей способностью.

Для данного исследования использовались данные о скорости и направлении ветра на высоте 100 метров над уровнем земли за период с 1992 по 2022 годы. Пространственное разрешение данных составляет 0.25 градуса по широте и долготе, что соответствует шагу приблизительно 27.8 км на местности. Временное разрешение данных составляет один час, что позволяет проводить детализированный анализ временных вариаций ветровых условий.

В исследовании были выбраны данные для региона, охватывающего координаты от 87.19 до 89.19 градусов восточной долготы и от 70.36 до 68.36 градусов северной широты. Этот регион включает в себя территорию Норильска и его окрестностей, что позволяет получить точное представление о ветровых условиях в этом районе. Выбор этого региона обоснован его важностью для размещения ветроустановок и уникальными климатическими особенностями, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических систем.

Одним из основных параметров ветра, который анализируется, является скорость ветра. Скорость ветра измеряется в метрах в секунду и может варьироваться в широком диапазоне значений. Для определения средней скорости ветра в Норильске проводится анализ данных, собранных на протяжении нескольких лет. Этот анализ позволяет

определить сезонные и годовые вариации скорости ветра, что важно для определения потенциала использования ветровой энергии в различные периоды времени.

Еще одним параметром ветра, который анализируется, является направление ветра. Направление ветра измеряется в градусах и может указывать на определенные климатические особенности региона. Анализ данных о направлении ветра в Норильске позволяет определить доминирующие ветровые направления и их изменения в разные периоды времени. Эта информация важна для определения оптимального размещения ветровых электрогенераторов и выбора наиболее эффективных моделей.

Анализ динамики параметров ветра в Норильске является важным этапом при расчете ветровых электрогенераторов для данного региона. Исторический обзор ветровых данных позволяет получить информацию о долгосрочных тенденциях и изменениях ветровых условий в Норильске. Анализ динамики параметров ветра позволяет определить сезонные и годовые вариации скорости и направления ветра, что важно для определения потенциала использования ветровой энергии. Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных моделей ветровых электрогенераторов и определения наиболее эффективных мест для их установки в Норильске.

1.2 Вариабельность параметров ветра в разные временные периоды

Анализ динамики параметров ветра в Норильске является важным аспектом при расчете ветровых электрогенераторов для данного региона. И поэтому понимание динамики параметров ветра в разные временные периоды является важной задачей для оптимального использования ветровых электрогенераторов.

Ветер в Норильске характеризуется высокой вариабельностью параметров, что обусловлено особенностями климата и географическим положением региона. Норильск расположен в северной части Сибири, вблизи горного массива Путорана, что влияет на формирование местных ветровых режимов. Кроме того, влияние арктического климата и близость к Баренцеву морю также оказывают существенное влияние на параметры ветра в регионе [19].

Обработка данных о ветре включала несколько ключевых этапов, начиная с загрузки данных из формата NetCDF и их последующего преобразования в структуры, удобные для анализа. Для этой цели использовались библиотеки `xarray`, `pumpru` и `pandas`, которые предоставляют мощные инструменты для работы с многомерными массивами данных и временными рядами. На следующем этапе из компонент скорости ветра `u100` и `v100`, представляющих собой горизонтальные и вертикальные составляющие скорости ветра соответственно, были рассчитаны модули скорости и направления ветра. Эти вычисления были выполнены с использованием стандартных тригонометрических преобразований, описанных ниже.

1.2.1 Вычисление скорости и направления ветра

Скорость ветра рассчитывалась как евклидова норма двух компонент скорости ветра, `u100` и `v100`, по следующей формуле:

Скорость ветра

$$V = \sqrt{(U^2 + V^2)}$$

Этот метод позволяет получить величину скорости ветра в каждой точке сетки и в каждый момент времени. Направление ветра

рассчитывалось с использованием арктангенса отношения компонент скорости, что позволяет определить угол направления ветра относительно северного направления. Формула для вычисления направления ветра имеет вид:

Направление ветра

$$\theta = \arctan 2(U, V) * (180 / \pi) + 180$$

1.2.2 Идентификация экстремальных ветровых событий

Экстремальные ветровые события были определены на основе статистического анализа скорости ветра. Для этого был рассчитан 95-й процентиль распределения скорости ветра, который использовался в качестве порогового значения для идентификации экстремальных событий. Все значения скорости ветра, превышающие этот порог, были классифицированы как экстремальные.

1.2.3 Временной анализ скорости и направления ветра

На графике 1.1 "Средняя почасовая скорость ветра" представлено распределение средней скорости ветра в течение суток. Из графика видно, что средняя скорость ветра остается достаточно стабильной на протяжении всего дня, колеблясь около значения 7 м/с. Отсутствие значительных изменений в скорости ветра в зависимости от времени суток указывает на равномерное распределение ветровой активности, что является важным фактором при планировании работы ветроустановок, так как не требуется учитывать суточные вариации для оптимальной работы турбин.

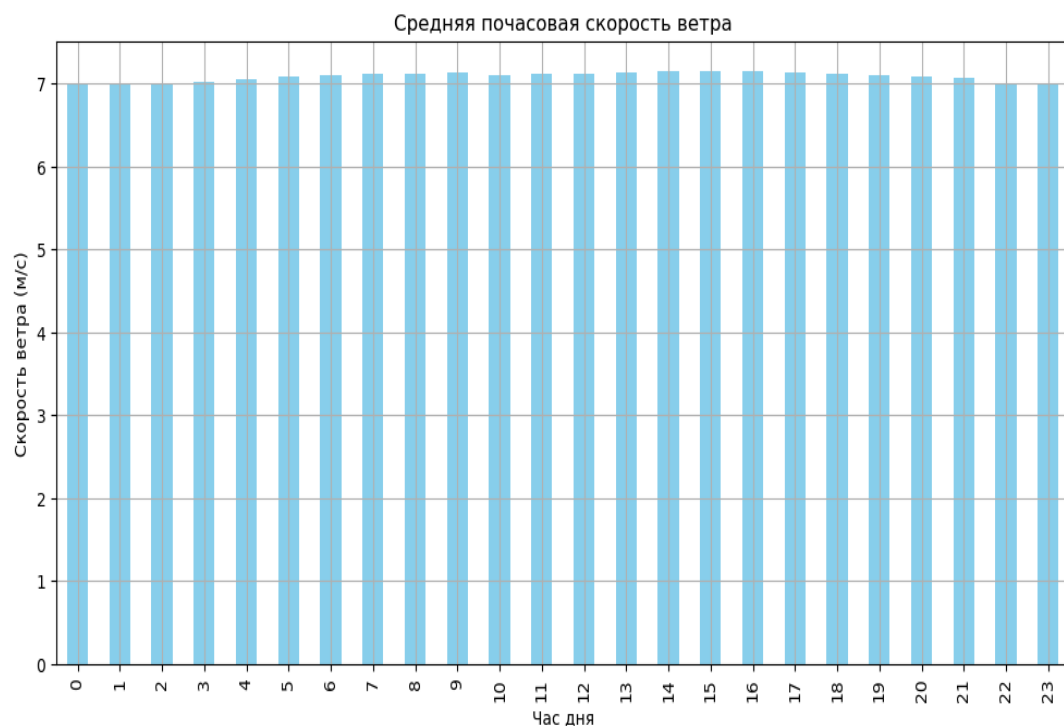


График 1.1 – Средняя почасовая скорость ветра для региона

На графике 1.2 "Среднее почасовое направление ветра" показано, что среднее направление ветра также остается стабильным в течение суток, колеблясь около 150-160 градусов. Это направление указывает на преобладание ветров с юго-восточного направления. Стабильность направления ветра в течение суток также является важным фактором для планирования работы ветроустановок.

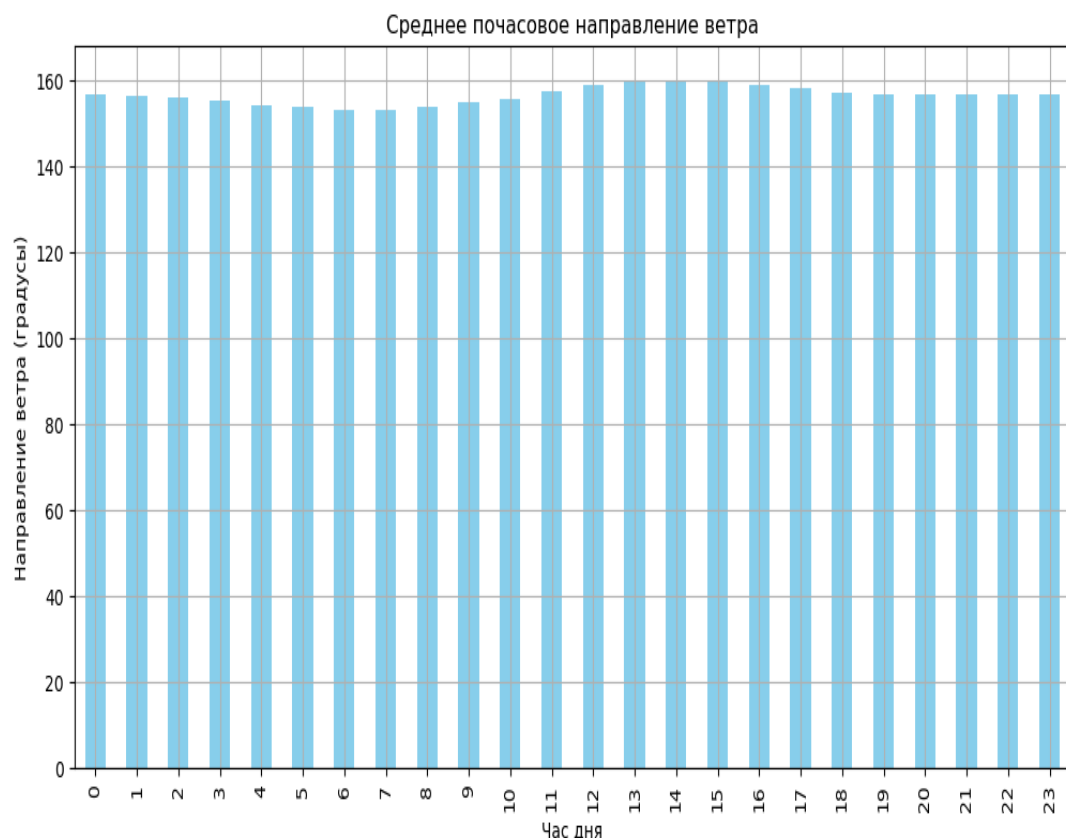


График 1.2 – Среднее почасовое направление ветра для региона

1.2.4 Дневной анализ

На графике 1.3 "Средняя дневная скорость ветра" представлена динамика средней дневной скорости ветра за период с 1992 по 2022 годы. График демонстрирует значительные колебания скорости ветра на протяжении всего периода наблюдений, с пиками, достигающими 20 м/с. Это свидетельствует о высокой изменчивости ветровых условий, что может влиять на стабильность выработки энергии ветроустановками. Такие колебания требуют разработки стратегий для управления турбинами при изменяющихся условиях, включая возможность временного отключения при экстремальных значениях скорости ветра.

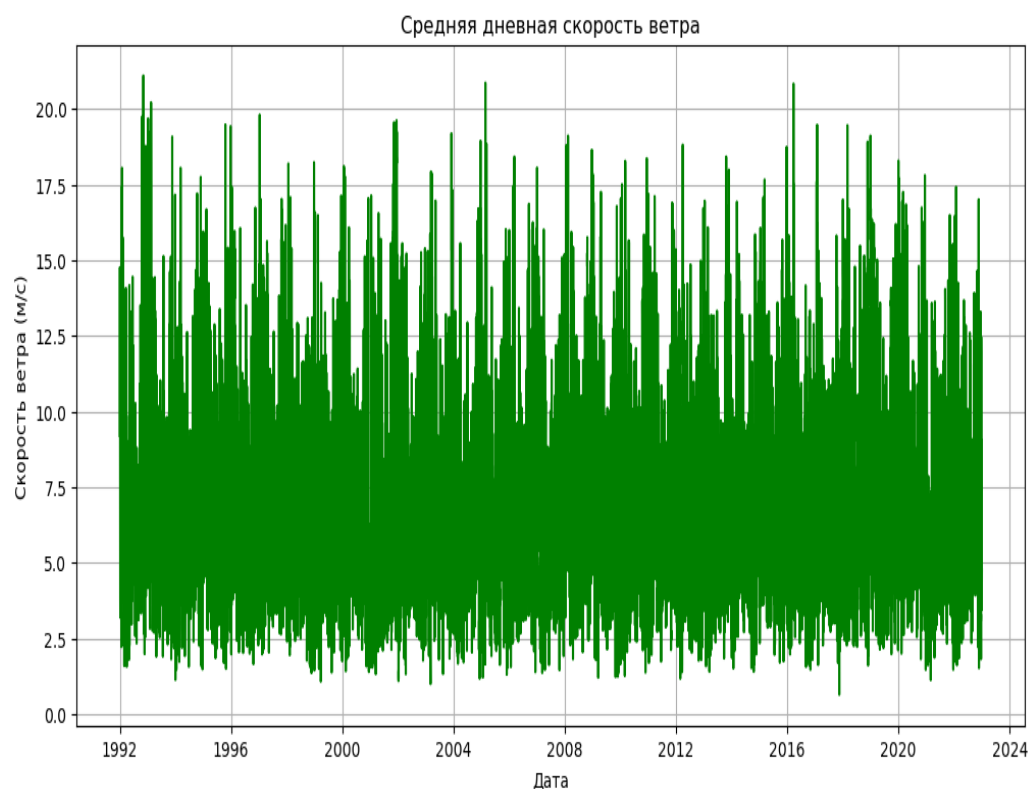


График 1.3 – Средняя дневная скорость ветра для региона

На графике 1.4 "Среднее дневное направление ветра" видно, что направление ветра значительно колеблется от 0 до 360 градусов в течение всего периода наблюдений. Это указывает на изменчивость ветровых условий, что также необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ветроустановок.

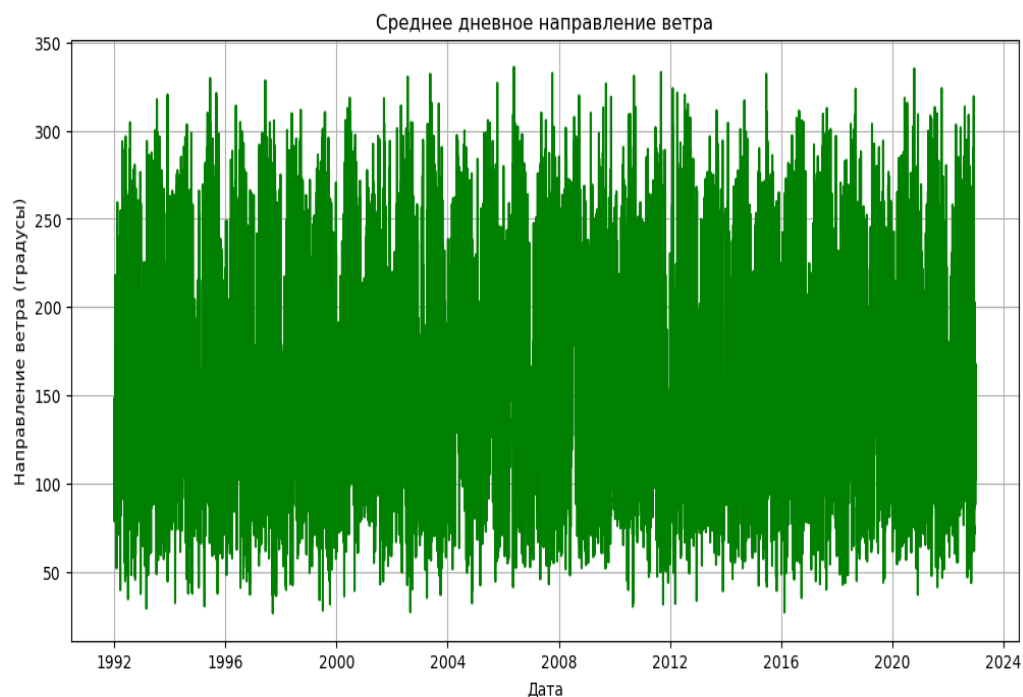


График 1.4 – Среднее дневное направление ветра для региона

1.2.5 Сезонный анализ

На графике 1.5 "Средняя месячная скорость ветра" представлены данные о средней скорости ветра по месяцам. Из графика видно, что наибольшая скорость ветра наблюдается в зимние месяцы (январь, декабрь), достигая около 8 м/с. Летние месяцы, такие как июнь и июль, характеризуются меньшими значениями скорости ветра, около 6 м/с. Это сезонное распределение подчеркивает важность учета временных изменений в планировании выработки энергии и эксплуатации ветроустановок. Зимние месяцы могут предоставить больше энергии, в то время как летом возможно снижение выработки.

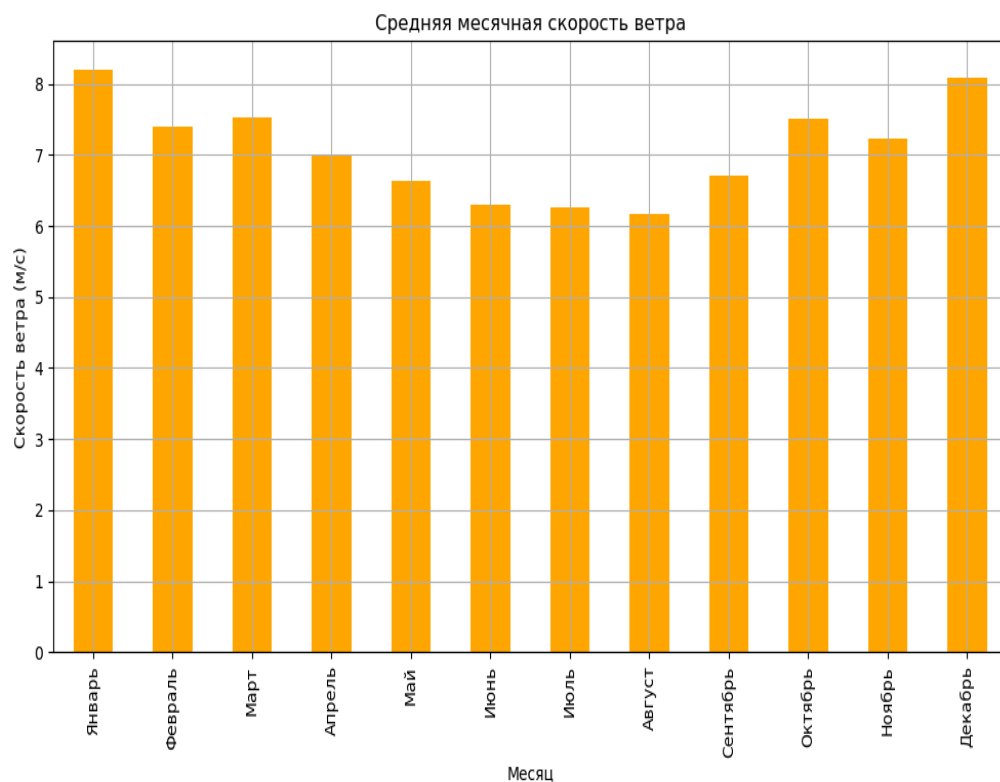


График 1.5 – Средняя месячная скорость ветра для региона

На графике 1.6 "Среднее месячное направление ветра" видно, что в летние месяцы (май-июль) преобладают ветры с южного и юго-восточного направлений (около 175-180 градусов), в то время как зимой (декабрь-февраль) направление ветра меняется на более северо-восточное (около 125 градусов). Эти сезонные изменения необходимо учитывать при проектировании ветроустановок, чтобы оптимально ориентировать турбины.

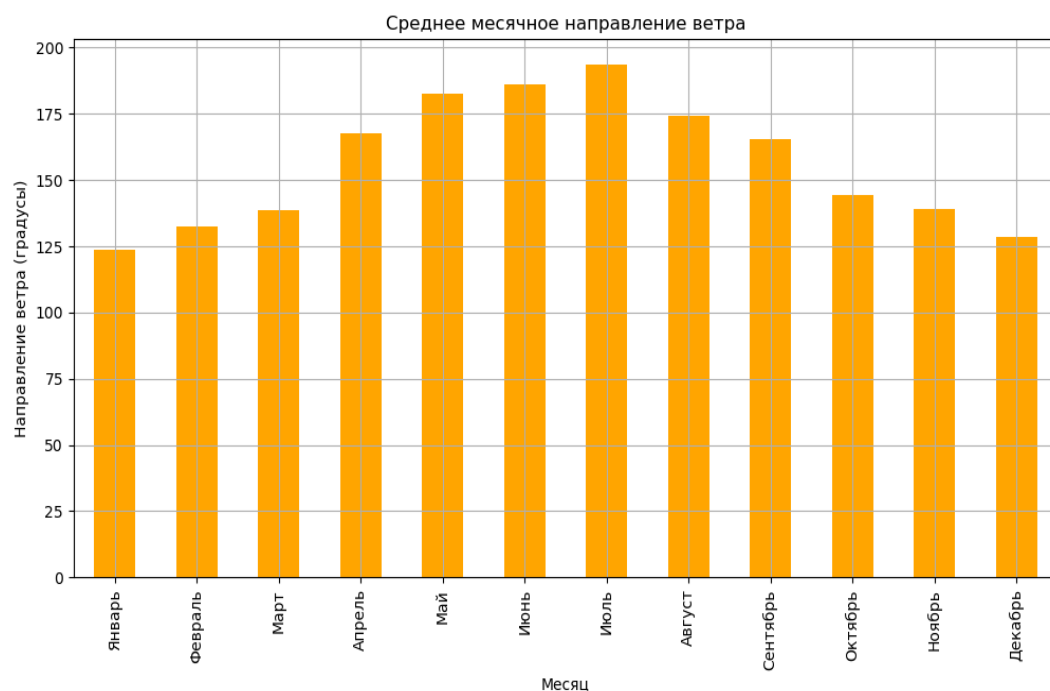


График 1.6 – Среднее месячное направление ветра для региона

1.2.6 Годовой анализ

На графике 1.7 "Средняя годовая скорость ветра" показана средняя годовая скорость ветра за период с 1992 по 2022 годы. График демонстрирует наличие долгосрочных трендов и межгодовых колебаний скорости ветра. Наиболее высокие значения наблюдаются в середине 90-х годов и в последние годы, достигая значений около 7.8 м/с. Пониженные значения скорости ветра наблюдались в начале 2000-х годов. Эти данные могут свидетельствовать о цикличности климатических условий и их влиянии на ветровую активность. Для долгосрочного планирования важно учитывать такие колебания и тренды для обеспечения устойчивой и предсказуемой работы ветроустановок.



График 1.7 – Средняя годовая скорость ветра для региона

1.2.7 Анализ розы ветров

На диаграмме 1.1 "Роза ветров для скорости и направления ветра" представлена роза ветров, которая показывает распределение частоты направлений и скоростей ветра. Из графика видно, что преобладают ветры восточного направления (Е), что согласуется с предыдущими анализами. Значительные скорости ветра (более 19 м/с) также наблюдаются в восточном направлении, что необходимо учитывать при проектировании ветроустановок для оптимальной ориентации и обеспечения устойчивости конструкции.

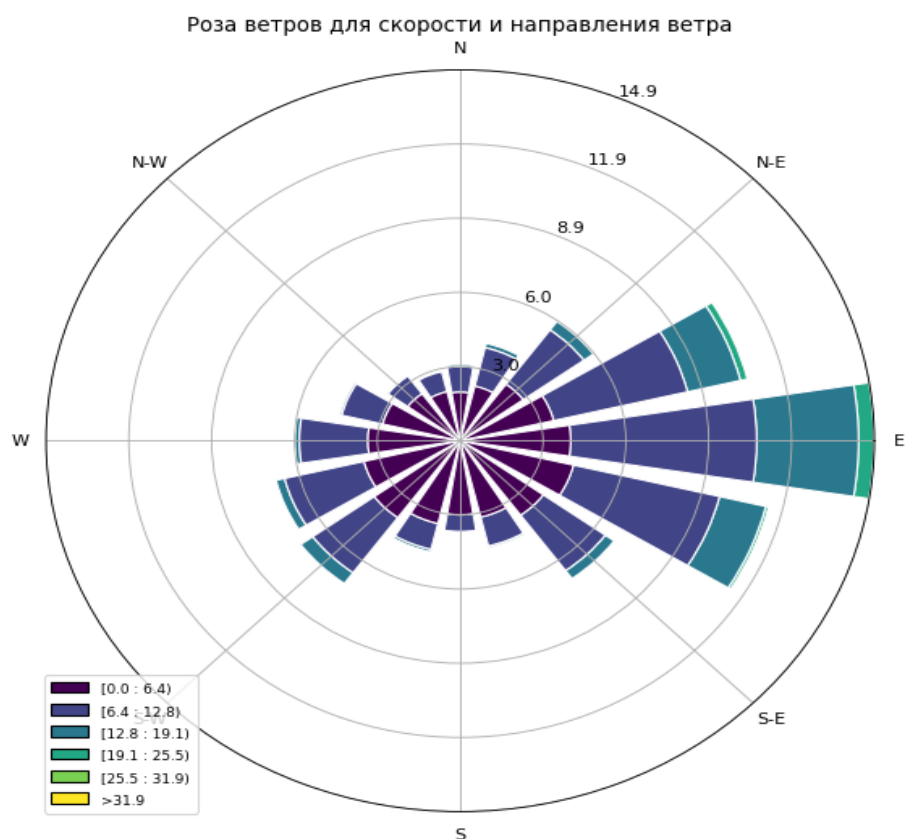


Диаграмма 1.1 – Роза ветров для скорости и направления ветра для региона

Временной анализ скорости и направления ветра в районе Норильска показал, что ветровые условия характеризуются стабильной почасовой активностью, значительными дневными колебаниями и выраженными сезонными и межгодовыми вариациями. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ветроустановок, чтобы обеспечить их эффективность и надежность в условиях изменчивого климата.

1.2.8 Пространственный анализ

На рисунке 1.2 "Средняя скорость ветра (м/с) на пространственной сетке" показано пространственное распределение средней скорости ветра в районе Норильска. График демонстрирует, что скорость ветра

варьируется в пределах от 5 до 8.5 м/с. Максимальные значения скорости ветра наблюдаются на северо-западе исследуемой области, достигая 8.5 м/с, что может быть связано с географическими особенностями и топографией региона. Напротив, минимальные значения скорости ветра, около 5 м/с, фиксируются на юго-востоке области.

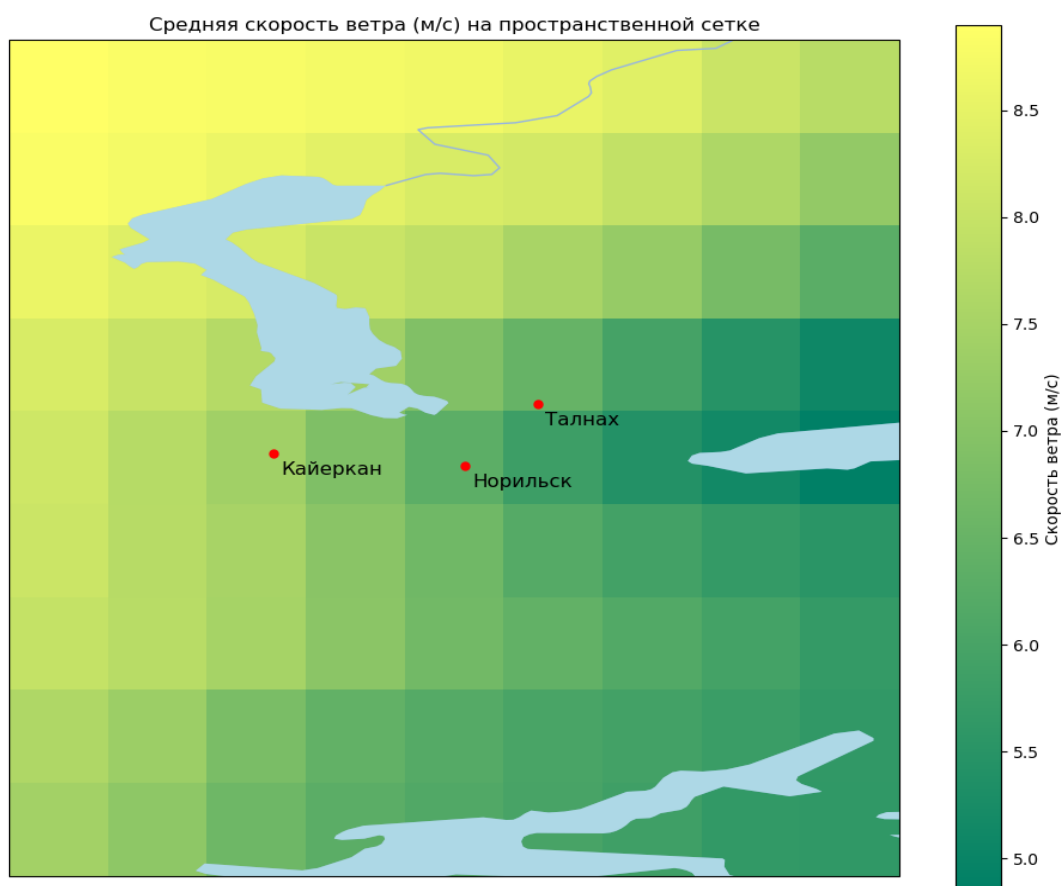


Рисунок 1.2 – Средняя скорость ветра (м/с) на пространственной сетке

Различия в средней скорости ветра по региону подчеркивают необходимость проведения детализированного анализа для выбора оптимальных мест для установки ветроустановок. Области с более высокой средней скоростью ветра обеспечивают большую выработку энергии и являются предпочтительными для размещения ветроустановок.

Важно также учитывать возможные препятствия и топографические особенности, которые могут влиять на локальные ветровые условия.

1.2.9 Среднее направление ветра

На рисунке 1.3 "Среднее направление ветра (градусы) на пространственной сетке" представлено распределение среднего направления ветра в исследуемом регионе. Среднее направление ветра варьируется от 145 до 165 градусов. В большинстве областей, включая Норильск, Кайеркан и Талнах, преобладающее направление ветра составляет около 155-160 градусов, что соответствует юго-восточному направлению. На северо-западе исследуемого региона направление ветра меняется на более северное (около 165 градусов), что также может быть связано с локальными топографическими особенностями.

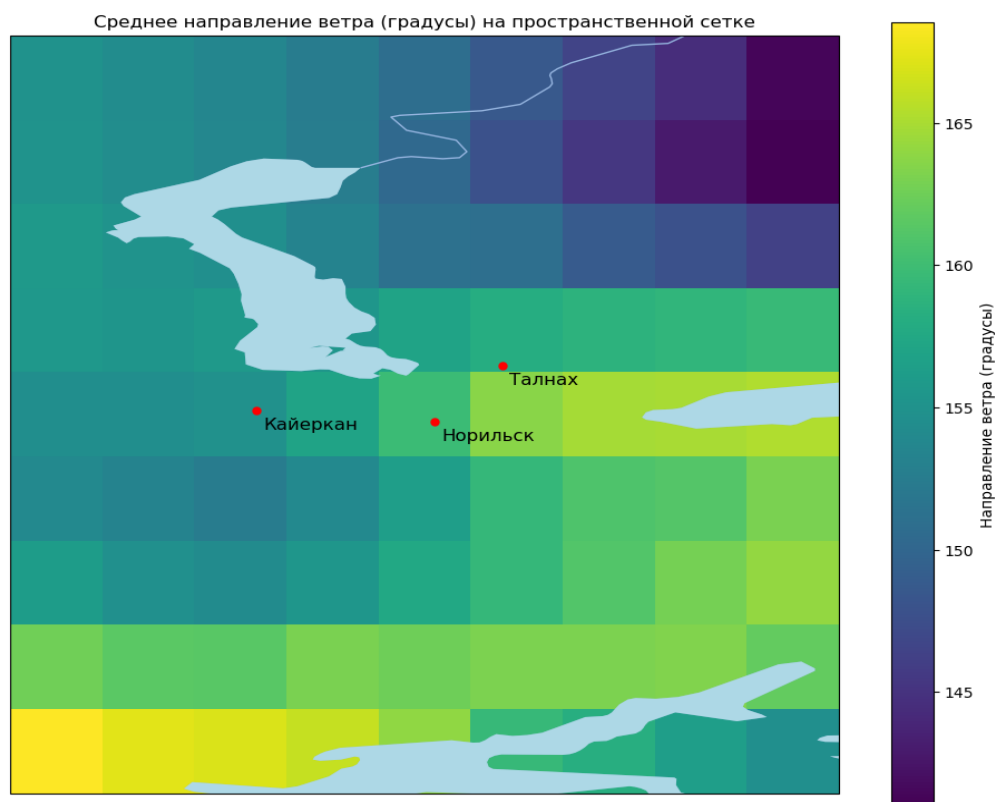


Рисунок 1.3 – Средняя скорость ветра (м/с) на пространственной сетке

Понимание пространственного распределения направления ветра важно для оптимальной ориентации ветроустановок. Ветроустановки должны быть ориентированы таким образом, чтобы максимально эффективно использовать преобладающее направление ветра. Это позволяет увеличить производительность и эффективность ветроустановок, а также уменьшить нагрузку на их конструкцию при изменении ветровых условий.

Пространственный анализ ветровых условий в районе Норильска показал значительные различия в средней скорости и направлении ветра по региону. Области с более высокой средней скоростью ветра и преобладающим юго-восточным направлением являются наиболее перспективными для размещения ветроустановок. Эти данные являются важными для планирования и проектирования ветроэнергетических систем, позволяя выбрать оптимальные места для установки турбин и обеспечить их эффективную и надежную работу.

1.3 Влияние природных и антропогенных факторов на динамику ветра

Ветер является одним из основных факторов, влияющих на работу ветровых электрогенераторов. Понимание динамики и характеристик ветра в конкретном регионе является необходимым для оптимального проектирования и расчета ветровых электрогенераторов.

Норильск- город в Красноярском крае России, расположенный в зоне сурового климата. Он характеризуется низкими температурами и сильными ветрами. Ветер в Норильске имеет сложную динамику, которая определяется как природными, так и антропогенными факторами [18].

Одним из основных природных факторов, влияющих на динамику ветра в Норильске, является географическое положение города. Норильск

расположен на плато, окруженном горами, что создает особые условия для формирования ветровых потоков. Горы могут вызывать эффект ветрового туннеля, усиливая скорость ветра и создавая его направленность. Кроме того, горы могут создавать вихревые потоки, что также влияет на динамику ветра [29]. На представленном изображении (рисунок 1.4) показано распределение высот в районе Норильска и его окрестностей. Цветовая шкала на правой стороне карты указывает значения высоты в футах.

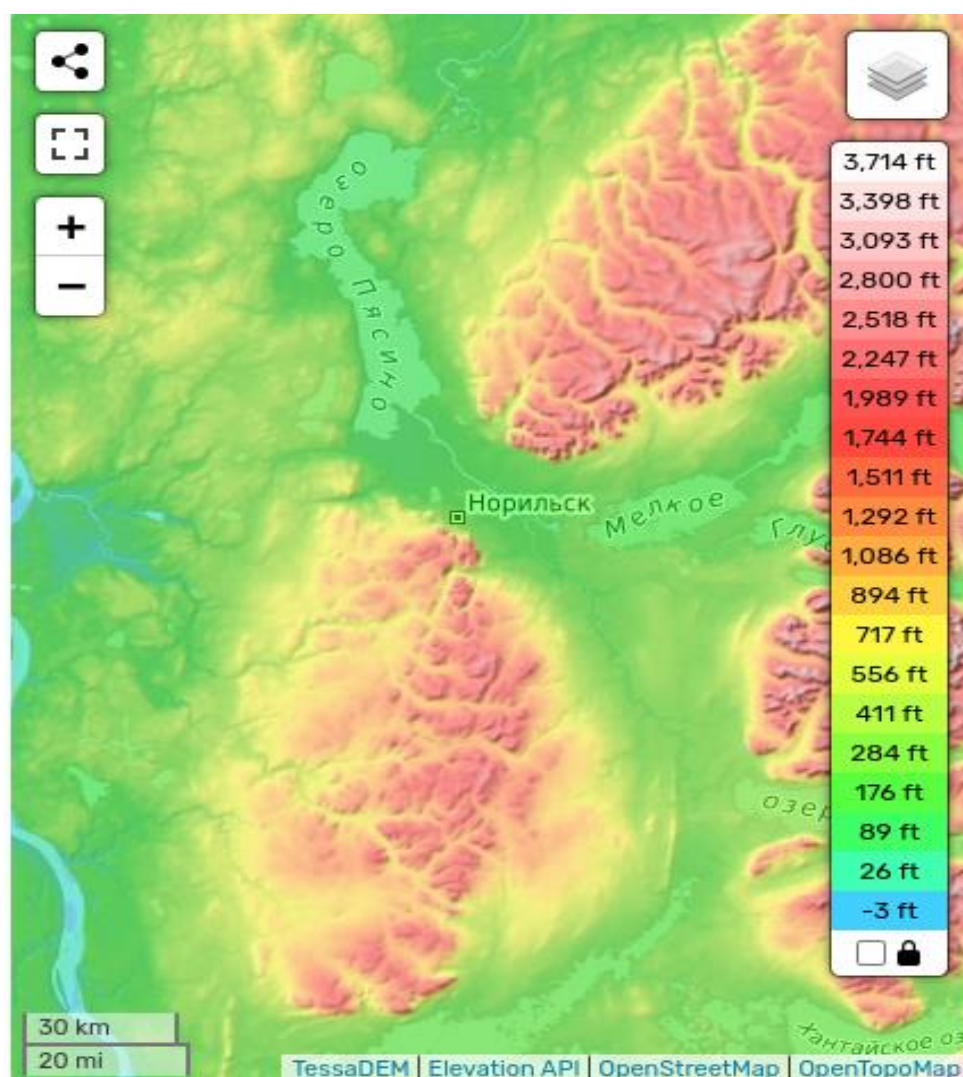


Рисунок 1.4 – Карта рельефа рассматриваемого района

1.3.1 Общая характеристика рельефа

Низменные районы:

На карте хорошо видны низменные области, окрашенные в синий и зеленый цвета, расположенные вдоль рек и озер. В частности, область вокруг реки Енисей и озера Пясино имеет высоты от 0 до 33 метров, что соответствует низменным территориям.

Эти области характеризуются относительно плоским рельефом, что может быть благоприятным для установки ветроустановок из-за отсутствия значительных препятствий для ветра.

Горные районы:

На востоке и юго-востоке региона видны горные районы, окрашенные в красные и оранжевые цвета, с высотами от 290 до 1131 метра.

Эти районы представляют собой более сложные условия для установки ветроустановок, так как горные хребты могут создавать турбулентные потоки и локальные изменения в скорости и направлении ветра.

Средневысотные районы:

Области, окрашенные в желтые и светло-зеленые цвета, представляют собой средневысотные территории с высотами от 98 до 290 метров.

Эти районы могут быть оптимальными для установки ветроустановок, так как они обеспечивают хорошее взаимодействие с ветровыми потоками при относительно умеренном рельефе.

Выводы для установки ветроустановок с учетом ветровых условий

Районы с высокой средней скоростью ветра:

Из анализа ветровых условий видно, что максимальные значения скорости ветра наблюдаются на северо-западе исследуемой области,

достигая 8.5 м/с. Эти районы также включают низменные и средневысотные участки, что делает их перспективными для установки ветроустановок.

Однако данные районы являются удаленными, что может представлять логистические сложности для установки и обслуживания ветроустановок. Тем не менее, высокая средняя скорость ветра делает эти территории привлекательными для рассмотрения.

Районы вокруг Норильска, Кайеркана и Талнаха:

Эти населенные пункты расположены в низменных и средневысотных районах, что делает их также потенциально благоприятными для установки ветроустановок.

Низменные области вокруг Норильска могут предложить стабильные ветровые условия с минимальными турбулентными потоками, что важно для эффективной работы ветроустановок. Хотя скорость ветра здесь ниже, чем на северо-западе, логистическая доступность может компенсировать это.

Горные районы на востоке и юго-востоке:

Высокие горные хребты могут представлять вызов для установки ветроустановок из-за сложных ветровых условий. Тем не менее, при правильном планировании и анализе конкретных местоположений возможно использование преимуществ более высоких скоростей ветра на этих высотах.

Еще одним природным фактором, влияющим на динамику ветра в Норильске, является климат. Зимой в городе часто бывают сильные морозы, что может вызывать изменение характеристик ветра. При низких температурах воздух становится более плотным, что может приводить к увеличению его скорости. [6].

Помимо природных факторов, влияние оказывает и антропогенная деятельность. Город является промышленным центром, в котором действует много предприятий, выделяющих большое количество выбросов

в атмосферу. Это может приводить к изменению характеристик ветра, так как выбросы могут создавать препятствия для его движения или изменять его направление. Например, выбросы промышленных предприятий могут вызывать образование тепловых потоков, что в свою очередь может изменять траекторию ветра.

Также стоит отметить, что антропогенные факторы могут влиять на динамику ветра в Норильске и через изменение ландшафта. Например, строительство высотных зданий или инфраструктуры может создавать препятствия для ветра, что может приводить к его усилению или изменению направления.

В целом, анализ динамики параметров ветра в Норильске позволяет определить особенности его характеристик и выявить влияние различных факторов на его динамику. Природные факторы, такие как географическое положение и климат, а также антропогенные факторы, связанные с промышленной деятельностью и изменением ландшафта, оказывают существенное влияние на динамику ветра в данном регионе. Понимание этих факторов является важным при проектировании ветрогенераторов для Норильска, так как позволяет определить оптимальные параметры и местоположение для их установки.

Анализ высотных данных и ветровых условий показывает, что рельеф местности вокруг Норильска варьируется от низменных до горных областей. Северо-западные районы, несмотря на их удаленность, представляют наибольший интерес для установки ветроустановок из-за высокой средней скорости ветра. Низменные и средневысотные районы вокруг Норильска также являются перспективными участками для установки ветроустановок благодаря их доступности и стабильным ветровым условиям. Горные районы требуют более детального анализа для выявления подходящих мест, учитывающих сложные ветровые условия.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

2.1 Методы сбора и обработки данных о ветре

Методы моделирования динамики параметров ветра являются важной составляющей при расчете ветровых электрогенераторов для Норильска. В данном разделе рассмотрены основные методы и модели, используемые для измерения, сбора и обработки данных о ветре.

Одним из основных методов измерения параметров ветра является использование анемометров. Анемометры представляют собой приборы, предназначенные для измерения скорости и направления ветра. Существует несколько различных типов анемометров, включая куполообразные, ультразвуковые и лазерные. Куполообразные анемометры основаны на использовании вращающихся чаш, которые измеряют скорость ветра на основе разности давлений между ветром и статическим давлением. Ультразвуковые анемометры используют ультразвуковые волны для измерения скорости и направления ветра. Лазерные анемометры, в свою очередь, используют лазерные лучи для измерения скорости ветра на основе эффекта Доплера [3].

Для сбора данных о ветре в реальном времени широко применяются метеорологические башни. Метеорологические башни представляют собой специальные сооружения, на которых устанавливаются различные измерительные приборы, включая анемометры, анемографы, термометры и барометры. Эти приборы позволяют измерять скорость, направление, температуру и давление ветра на разных высотах. Данные, полученные с помощью метеорологических башен, могут быть использованы для анализа динамики параметров ветра и определения оптимальных условий для работы ветровых электрогенераторов [25]

Для обработки данных о ветре используются различные методы и модели. Одним из основных методов является статистический анализ. Статистический анализ позволяет определить среднюю скорость и направление ветра, а также их изменчивость в течение определенного периода времени. Для этого используются различные статистические показатели, такие как среднее значение, стандартное отклонение, вариация и корреляция. Статистический анализ позволяет определить характеристики ветра, которые могут быть использованы при проектировании и эксплуатации ветровых электрогенераторов [12].

В заключение, методы и моделирование динамики параметров ветра играют важную роль при расчете ветровых электрогенераторов для Норильска. Использование анемометров и метеорологических башен позволяет собирать данные о скорости, направлении, температуре и давлении ветра. Статистический анализ и математические модели позволяют обработать эти данные и определить оптимальные условия для работы ветровых электрогенераторов. Это позволяет повысить эффективность и надежность работы ветровых электрогенераторов и улучшить энергетическую эффективность Норильска.

2.2 Моделирование экстремальных ветровых событий с использованием численных методов

Методы и моделирование динамики параметров ветра являются важным аспектом при расчете ветровых электрогенераторов для Норильска. Ветер является одним из наиболее доступных источников возобновляемой энергии, и его динамика имеет прямое влияние на производительность ветровых электрогенераторов. Поэтому, для эффективного использования ветра как источника энергии, необходимо

учитывать экстремальные ветровые события с использованием численных методов.

2.2.1 Идентификация экстремальных событий

Экстремальные ветровые события были определены на основе статистического анализа скорости ветра. Для этого был рассчитан 95-й процентиль распределения скорости ветра, который использовался в качестве порогового значения для идентификации экстремальных событий. Все значения скорости ветра, превышающие этот порог, были классифицированы как экстремальные.

Порог для экстремальных ветровых событий: 15.10 м/с

2.2.2 Частота экстремальных ветровых событий по годам

График 2.1 "Частота экстремальных ветровых событий по годам" показывает количество экстремальных ветровых событий для каждого года. Из графика видно, что количество экстремальных событий значительно варьируется от года к году, что указывает на высокую изменчивость ветровых условий.



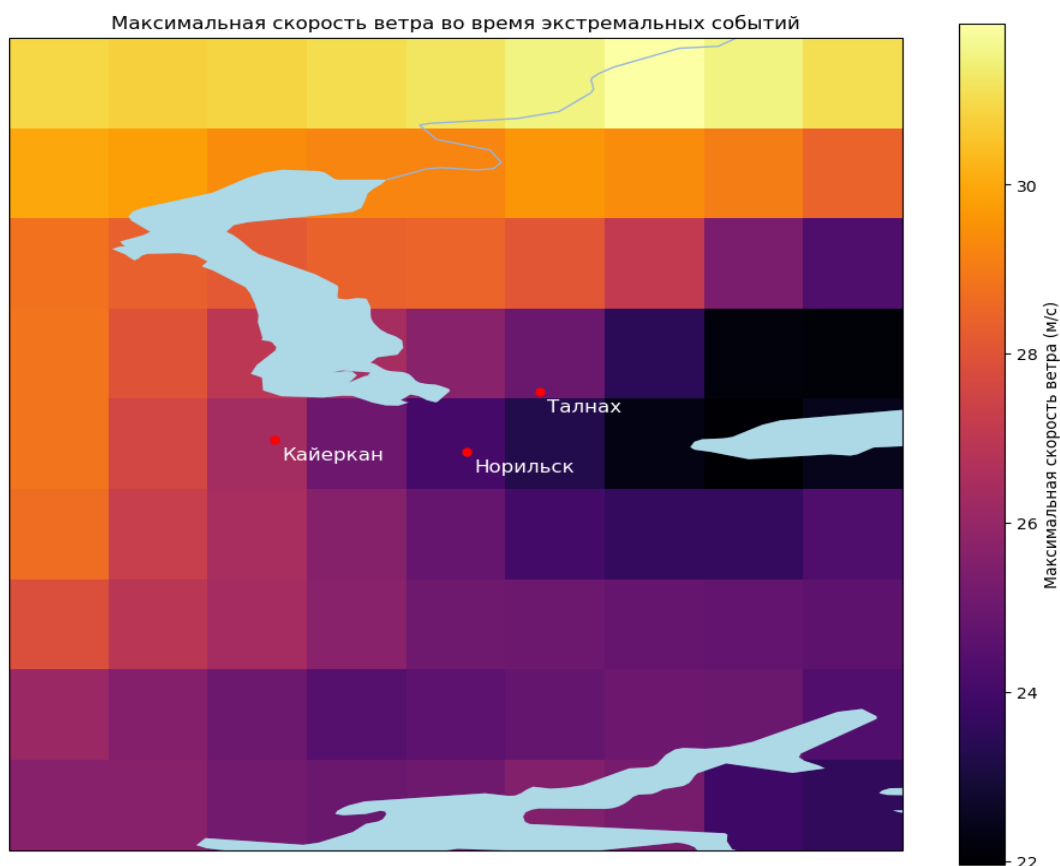
График 2.1 – Частота экстремальных ветровых событий по годам для региона

2.2.3 Пространственное распределение экстремальных событий

На представленных графиках показаны результаты анализа экстремальных ветровых событий в районе Норильска:

Максимальная скорость ветра во время экстремальных событий

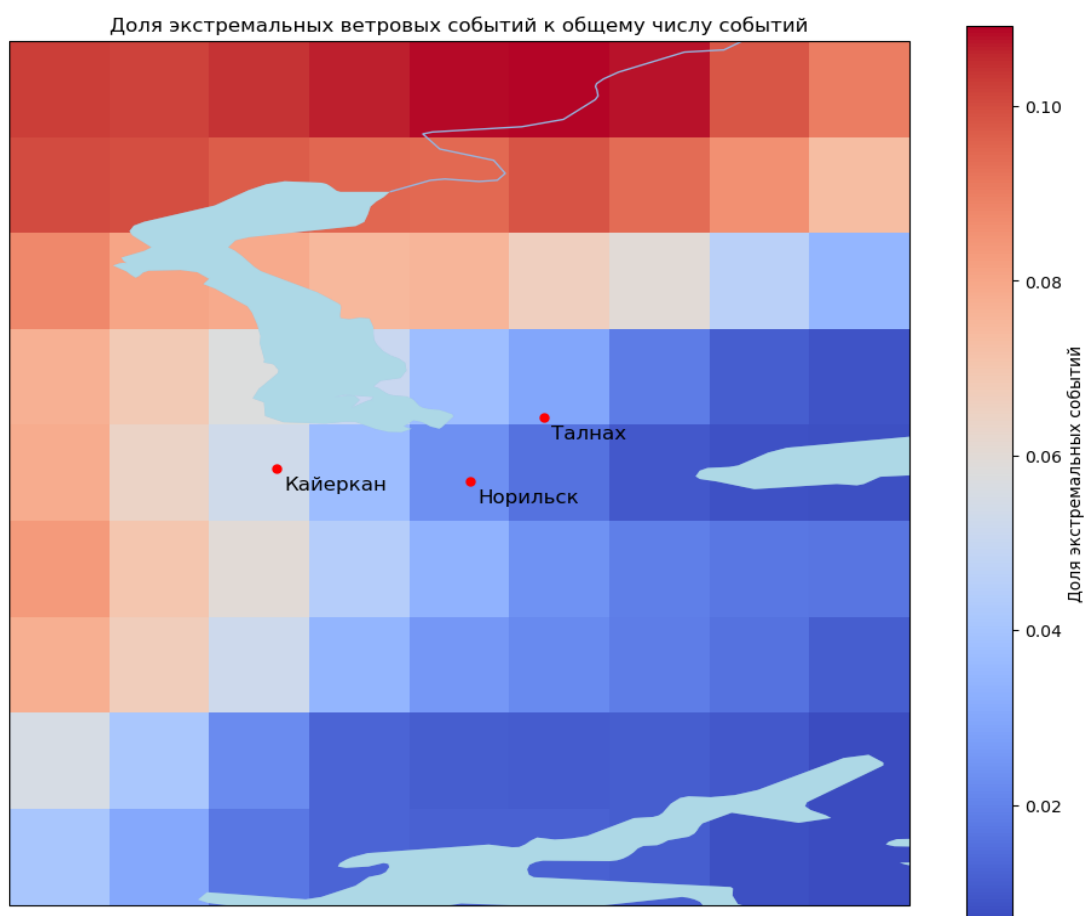
На карте 2.1 "Максимальная скорость ветра во время экстремальных ветровых событий" представлено пространственное распределение максимальных скоростей ветра в регионе. Наиболее высокие скорости ветра (до 30 м/с) наблюдаются в северо-западной части исследуемой области. Это совпадает с результатами пространственного анализа средней скорости ветра, где северо-западные районы показали наибольшую среднюю скорость ветра.



Карта 2.1 – Максимальная скорость ветра во время экстремальных ветровых событий

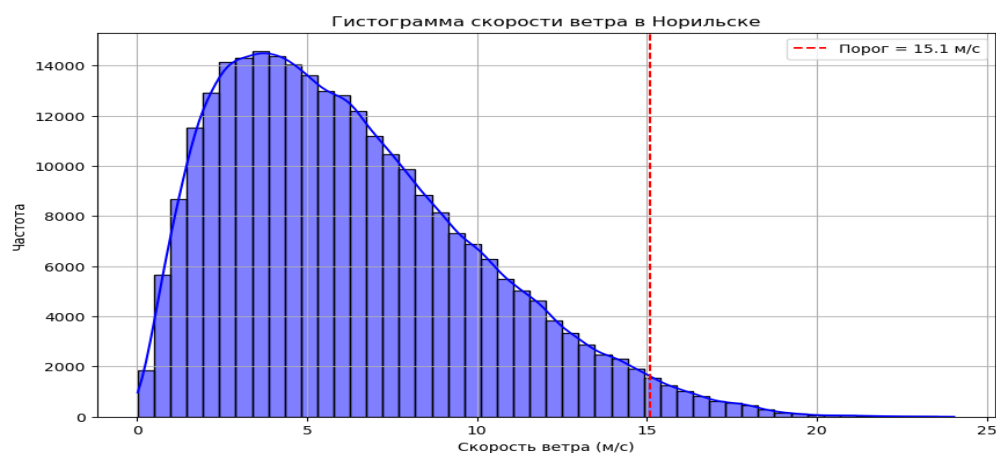
Доля экстремальных ветровых событий к общему числу событий

На карте 2.6 "Доля экстремальных ветровых событий к общему числу событий" показано соотношение экстремальных ветровых событий к общему числу ветровых событий. Из карты видно, что наибольшая доля экстремальных событий наблюдается также в северо-западной части исследуемого региона. Эти данные подчеркивают важность учета экстремальных ветровых условий при проектировании и эксплуатации ветроустановок в этом районе.



Карте 2.6 – Доля экстремальных ветровых событий к общему числу событий

Гистограммы ниже показывают распределение скорости ветра в двух ключевых точках: Норильске и самой северо-западной точке.



Гистограмма 2.2 – Гистограмма скорости ветра в Норильске.

Гистограмма показывает, что большая часть скоростей ветра в Норильске находится ниже порогового значения 15.1 м/с.

Это означает, что экстремальные ветровые события с скоростью выше 15.1 м/с относительно редки в этой точке.

Наиболее частые значения скорости ветра находятся в диапазоне от 3 до 8 м/с.



Гистограмма 2.2 – Гистограмма скорости ветра в северо-западной точке.

Гистограмма показывает, что северо-западная точка также имеет большую часть скоростей ветра ниже порогового значения 15.1 м/с, однако, частота значений вблизи порога выше, чем в Норильске.

Это указывает на более высокую вероятность экстремальных ветровых событий в северо-западной точке по сравнению с Норильском.

Наиболее частые значения скорости ветра в северо-западной точке находятся в диапазоне от 4 до 10 м/с, и распределение имеет более длинный "хвост" к высоким скоростям ветра.

Анализ экстремальных ветровых событий показал значительные различия в частоте и интенсивности экстремальных ветровых условий в районе Норильска. Северо-западные районы, несмотря на их удаленность, демонстрируют высокую частоту экстремальных событий и высокие скорости ветра, что делает их перспективными для ветроэнергетических проектов при условии правильного проектирования ветроустановок. Окрестности Норильска, Кайеркана и Талнаха также являются перспективными участками для установки ветроустановок благодаря стабильным ветровым условиям и меньшим рискам экстремальных событий.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА НА РАБОТУ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

3.1 Анализ конструкций ветрогенераторов

Ветрогенератор представляет собой устройство, которое путем преобразования ветрового потока вырабатывает электрическую или механическую энергию, для ее последующего использования потребителями.

На данный момент известны два основных типа ветрогенераторов, конструктивные отличия, которых состоят в расположении оси вращения элемента, улавливающего энергию ветра. Ветряные генераторы бывают:

- с горизонтальной осью вращения (рис.3.7, а);
- с вертикальной осью вращения (рис.3.7., б).

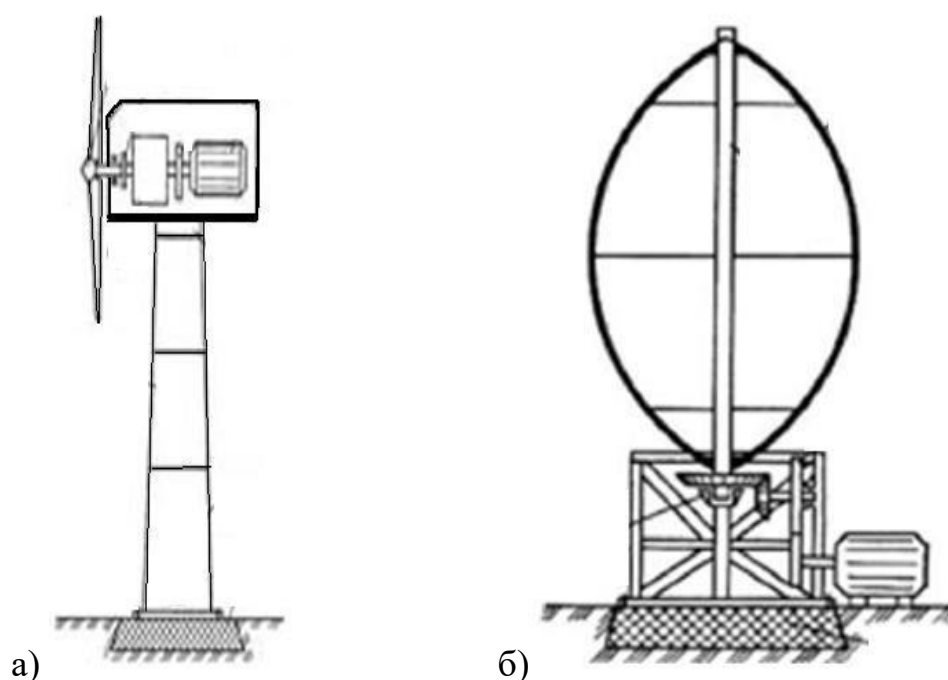


Рисунок 3.7 – Внешний ветроустановки с горизонтальной осью вращения (а) и с вертикальной осью (б)

Принцип работы ветрогенератора – очень простой. Поток ветра оказывает давление на лопасти (позиция 12 на рис.3.8) ветрового колеса. Ротор (позиция 1 на рис.3.8) ветрового колеса закреплен на низкоскоростном валу (позиция 2 на рис.3.8). Под воздействием ветра ветряное колесо (ротор с лопастями и низкоскоростной вал) начинает вращаться, осуществляя преобразование ветряной энергии в механическую. От низкоскоростного вала через редуктор (позиция 3 на рис.3.8) механическое движение передается на вал (позиция 8 на рис.3.8) электрического генератора (позиция 4 на рис.3.8). При вращении ротора электрогенератора осуществляется преобразование механической энергии в электрическую.

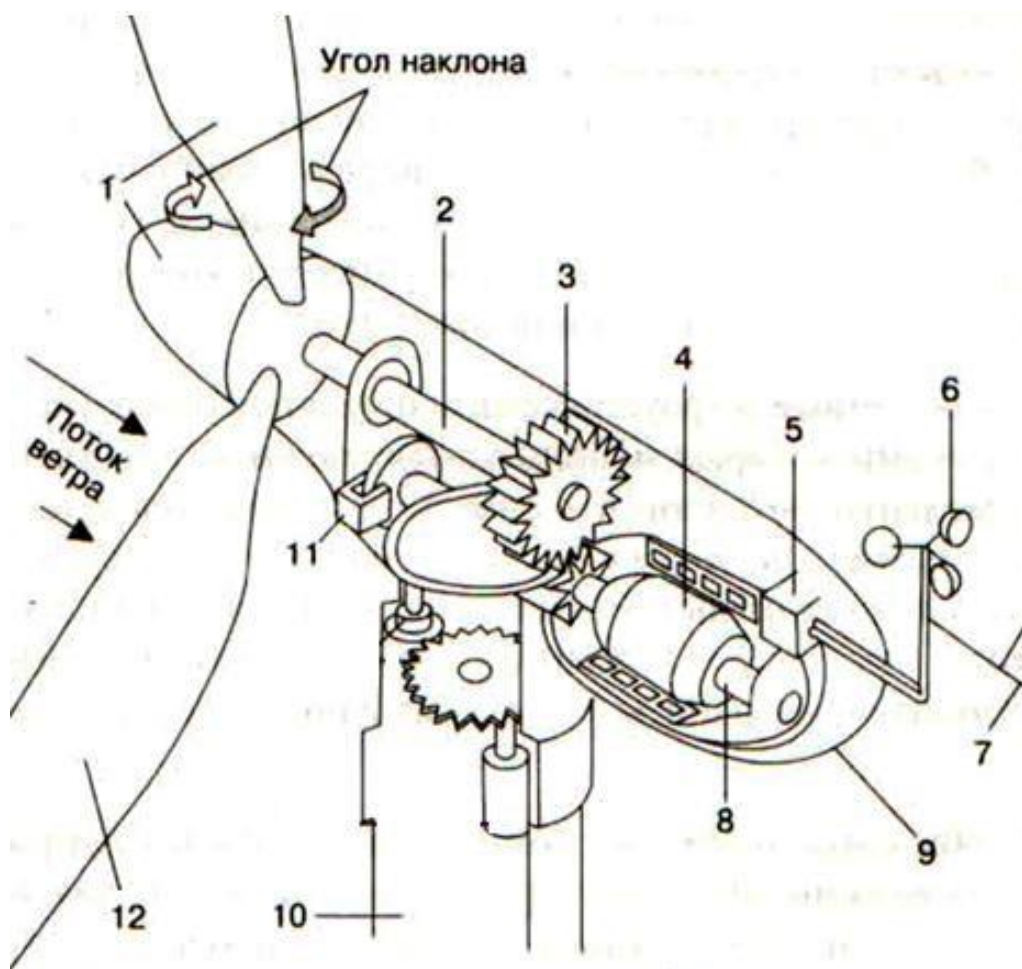


Рисунок 3.8 – Конструктивная схема ветроустановки

Несмотря на имеющиеся сходство, имеются существенные различия в характеристиках ветрогенераторов с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Проанализируем технические возможности ветрогенераторов обоих конструктивных типов.

3.1.1 Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения

На данном этапе горизонтальные ветрогенераторы имеют наибольшую популярность. У них ось вращения ветряного колеса, лопасти которого вращаются против ветра, расположена параллельно земле. Конструкция горизонтальных ветрогенераторов 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. Считается, что этот тип ветрогенераторов годится 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, различают одно-, двух-, трех- и многолопастные модификации.

В состав ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения в обязательном порядке входят дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие ориентацию ротора ветроколеса по ветру, что усложняет конструкцию и является недостатком данной разновидности ВЭУ.

Преимуществом ветрогенераторов с горизонтальным вращением вала является их большая эффективность по сравнению с моделями, где ось вращения располагается вертикально. 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, генерирующим одинаковую мощность.

Рассмотрим конструктивные исполнения горизонтальных ВЭУ.

а) Однолопастные ветрогенераторы

Главное достоинство однолопастных ветрогенераторов – высокие обороты вращения. У них 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.

Недостатки однолопастного ветряка:

- Из-за высокой скорости вращения велик гироскопический эффект, что замедляет поворот ротора при смене 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.

На рисунке 3.9 приведен пример однолопастного ветрогенератора, выпускаемого компанией ООО «Электроветер» (Россия).



Рисунок 3.9 –Однолопастный ветрогенератор с противовесом

б) Двухлопастные ветрогенераторы

Ветрогенераторы двухлопастного типа – по устройству схожи с однолопастными, только отличаются количеством лопастей. По сравнению с однолопастной конструкцией они имеют преимущество. Поскольку здесь количество лопастей – четное, из-за этого ротор ветроколеса остается уравновешенным при любом угловом положении его лопастей. Поэтому здесь нет дополнительных конструктивных элементов, обеспечивающих уравновешенность конструкции. Упрощение конструкции ведет к снижению стоимости данной модификации по сравнению с аналогичной моделью однолопастной ВЭУ.

Недостатком рассматриваемой конструкции является то, что она более шумная и подверженная вибрации.

Примером самоподъемной двухлопастной ветроустановки является Gev MP, номинальной мощностью 275 кВт (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 –Двухлопастный ветрогенератор

в) Трехлопастные ветрогенераторы

Это – самая распространенная модификация ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения вала ветроколеса.

Исследования, проведенные датскими учеными еще в 70-х годах прошлого века, показали, что оптимальное количество лопастей горизонтальных ветрогенераторов равно трем. Это заключение было хорошо усвоено крупными производителями ветрогенераторов [1, с.15]. Поэтому именно эти ветряки наиболее широко представлены на рынке. Ветрогенераторы с тремя лопастями выпускаются с мощностями от нескольких ватт до нескольких мегаватт. В качестве примера на рисунке 3.5 представлена одна из самых мощных на сегодняшний день трехлопастных ветроэнергетических установок марки Enercon E-126, номинальной мощностью 7 мВт.



Рисунок 3.11 –Трехлопастный ветрогенератор

г) Многолопастные ветрогенераторы

К многолопастным относятся горизонтальные ветрогенераторы с количеством лопастей, находящимся в интервале от 4 до 50. Роторы ветроколес 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 соответствуют требованиям энергопитания водяных насосов. Поэтому их обычно применяют в качестве альтернативных источников электрической энергии в водонасосных системах.



Рисунок 3.12 –Многолопастной ВЭУ

3.2.1 Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения

Вертикальные ветрогенераторы являются менее эффективными по сравнению с горизонтальными. Их КПД в 3 раза меньше, чем у горизонтальных модификаций.

Лопasti вертикального ветрогенератора крутятся перпендикулярно поверхности земли при любом направлении и силе ветра. Поэтому половина от общего количества лопастей ветроколеса всегда вращается против ветра. Из-за этого у ветрогенератора с вертикальным вращением ветроколеса половина мощности потока ветра не используется, что сильно снижает их энергоэффективность.

Это является главный недостаток. Так же имеются недостатки следующего типа:

- Нет возможности в самостоятельном запуске лопастей;
- Значительная нагрузка на элементы конструкции;
- Лопаста должны быть идентичны и соответствовать профилю;
- Повышенный уровень шума в процессе работы.

Однако ветрогенераторы с вертикальным вращением ветроколеса имеют определенные достоинства. Например, у этих моделей упрощается монтаж и эксплуатация. Это объясняется тем, что в конструкции с вертикальным ветроколесом редуктор и электрогенератор размещаются на земле. Конструктивным преимуществом является также то, что для них не требуется флюгер. Они характеризуются самостоятельной ориентацией по отношению к воздушным потокам.

Конструкции вертикальных ветрогенераторов имеют существенные различия из-за разных модификаций ветряных колес. Рассмотрим наиболее распространенные варианты.

а) Ротор Савониуса

Представляет собой конструкцию, в которой лопасти ротора выполнены в виде цилиндрических поверхностей. (рис.3.13)

Преимущества ротора Савониуса:

- способность запускаться при малых значениях ветра, движение начинается при значениях от 3м/сек;
- быстрый набор высоких показателей крутящего момента;
- высокая надёжность конструкции;
- сравнительно невысокая стоимость производства.

Ветряки с ротором Савониуса имеют такой же недостаток, как и все вертикальные ветрогенераторы. Это – неполное использование ветровой энергии и, как следствие, низкая эффективность преобразования воздушного потока. Поэтому промышленный выпуск данных устройств осуществляется с мощностью, не превышающей 4–6кВт.

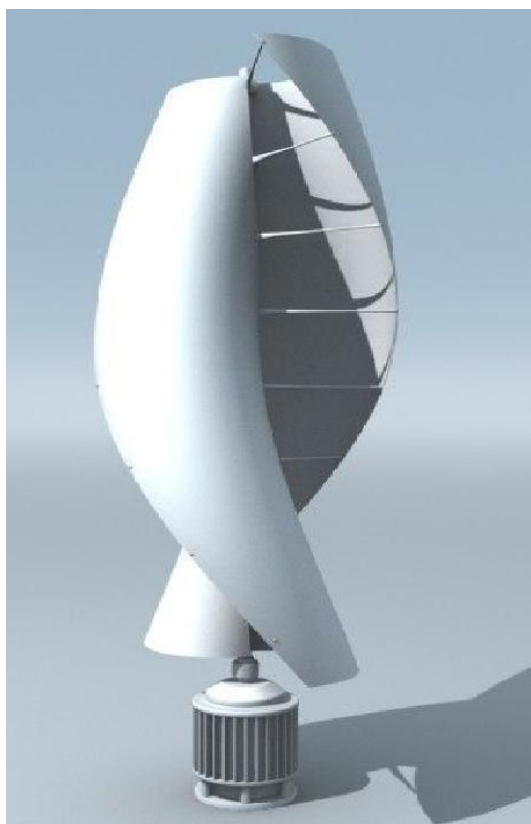


Рисунок 3.13 – Внешний вид ротора Савониуса

б) Ротор Дарье

Вертикальный ветряк с ротором Дарье был изобретен на несколько десятков лет позже обычного. Внешне, такой ветрогенератор выполнен с двумя или тремя лопастями, изогнутыми в форме овала (рис. 3.14).

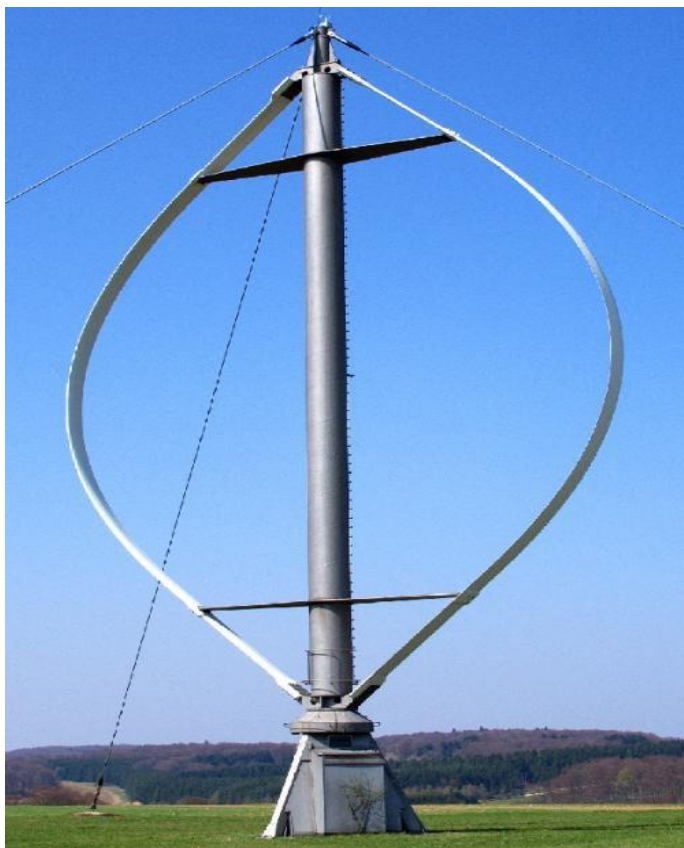


Рисунок 3.14 – Ветрогенераторы с ротором Дарье

Ветрогенераторы с ротором Дарье просты в изготовлении и легки в монтаже. Так же их достоинством является самостоятельная ориентация на направление воздушного потока. Основной вал привода располагается вблизи уровня земли, что создаёт удобство в его обслуживании.

Главным недостатком такого ветрогенератора является то, что ротор нужно запускать вручную. Его отличает также высокая нагрузка на опорные узлы, вызванная динамическим воздействием от воздушных потоков. Для нормальной работы ветряка необходимо строго

придерживаться заданного профиля лопасти по всей её длине. Ветряк с ротором Дарье достаточно шумен в работе.

в) Геликоидный ротор.

Геликоидный ротор является развитием вертикально-осевого ветроколеса. Лопасти 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. Эффективность использования ветрового потока близка к горизонтальным устройствам. В то же время, это вызывает повышенный шум при работе и производит звуковые волны, расположенные в коротковолновой части звукового спектра. Геликоидный ротор дорог в производстве из-за сложной конфигурации профиля лопастей (рис 3.15).



Рисунок 3.15 – Ветрогенераторы с Геликоидный ротором

г) Многолопастной ротор

Это – модификация вертикально-осевой конструкции ветроколеса, дополненная внешним кольцом неподвижных лопастей. Такая схема способствует увеличению полезной площади захвата воздушного потока, его сжатию и ускорению, что приводит к повышению эффективности ветрогенератора в целом. Кроме этого, конструкция чувствительна к слабым воздействиям ветра. Многолопастной ротор характеризуется повышенной материалоемкостью, что увеличивает стоимость ветрогенератора в целом. В процессе эксплуатации конструкцию ветрогенератора с многолопастным ротором сопровождает увеличенный звуковой фон (рис 3.16).



Рисунок 3.16 – Внешний вид многолопастного ротора

На основе изучения конструкционных и технологических особенностей промышленных ВЭУ можно сделать следующие выводы.

1). Вертикальный ветрогенератор имеет меньший момент трогания. Следовательно, он способен работать, начиная с минимальных скоростей ветра. Горизонтальный – более мощный, следовательно, он способен снабжать энергией электропримемники значительно большей мощности.

2). Вертикально-осевые ВЭУ устанавливаются на земле, тем самым облегчают доступ к генератору и их обслуживание.

3). Вертикальные ветрогенераторы не боятся разнонаправленного ветра или бури, так как у них минимальное сопротивление ветру. Все эти качества позволяют устанавливать эти ВЭУ близко к жилью и даже в городах.

4). В среднем большинство современных горизонтальных ветроэнергетических установок характеризуется коэффициентом использования ветра, равным 0,48. Из данных специальных исследований следует, что этот коэффициент можно увеличить. Например, у некоторых конструкций ВЭУ, отличающихся совершенными аэродинамическими характеристиками, коэффициент использования энергии ветра может достигать значения, равного 0,593.

5) Горизонтально-осевые ВЭУ имеют более высокий коэффициент полезного действия ($\eta = 40\text{--}59\%$). Поэтому эти ветрогенераторы могут использоваться как для бытового применения, так и для промышленного производства электроэнергии.

6). Определенным недостатком горизонтальных ветрогенераторов можно считать необходимость в постоянном поиске ветра при помощи флюгера, который является дополнительным устройством в составе ВЭУ, усложняющим конструкцию и повышающим ее стоимость.

3.2 Расчет потенциальной мощности ветрогенераторов разных типов

Для проведения анализа о вырабатываемой мощности в районе Норильска, нужно провести расчеты и визуализацию данных. Для проведения расчетов будем использовать технические характеристики отечественных ВЭУ с горизонтальным и вертикальным типом вращения, приведенные в таблице 3.1 и таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Полные характеристики горизонтальной установки ROSVETRO FK-20K (рис 3.17)

Тип	Горизонтальный
Ном.мощность	20 кВт
Макс. мощность	22 кВт
Диаметр колеса	7.3 м
Ном. напряжение	220-380V
Пусковая скорость ветра	3 м/с
Ном. скорость ветра	12 м/с
Кол-во лопастей	3
Длинна лопастей	3,5 м
Рабочая температура	-30 °С ~ 50 °С
Контроллер	PWM
Материал корпуса	Сталь, алюминий, композит
Вес (кг)	640
Срок службы	10 лет
Производство	КНР / Россия
Автоориентирование на ветер	Да
Защита от ураганных ветров	Да
Уровень шума	Низкий, 85 Дб
Рекомендованные аккумуляторы	min 200 А*ч
Рабочая скорость ветра	3 - 13 м/с
Макс. рекомендуемая ск. ветра до остановки	До 16 м/с
Поддержание мин. оборотов	Да
Охлаждение генератора	Воздушное
Ном. число об/мин.	~ 180
Ток с генератора	Переменный, 3 фазы
Класс защиты	IP67
Работа в дождливые дни	Да



Рисунок.3.17 – Установка ROSVETRO FK-20K [24]

Таблица 3. 2 – Полные характеристики вертикальной установки АРКТИК ВС-1200 (рис 3.18)

Тип	Вертикальный
Ном.мощность	12 кВт
Макс. мощность	12.5 кВт
Диаметр колеса	1,2 м
Ном. напряжение	24V
Пусковая скорость ветра	1.5 м/с
Ном. скорость ветра	11 м/с
Кол-во лопастей	7
Длинна лопастей	1.2 м
Рабочая температура	-55 °С ~ 50 °С
Контроллер	MPPT
Материал корпуса	Сталь с покрытием, стеклопластик
Вес (кг)	370
Срок службы	20 лет
Производство	Россия
Автоориентирование на ветер	Да
Защита от ураганных ветров	Да
Уровень шума	Низкий, до 45 Дб
Крепеж на мачту	Фланец
Контроллер заряда	В комплекте
Аккумуляторы	200 А/ч Carbon
Мачта	6 метров
Высота, м	6,5 м
Толщина трубы, мм	159 мм
Тип соединения	Фланцевое
Размер секции, м	3 м
Электропривод	Не требуется
Охлаждение генератора	Воздушное
Ном. число об/мин.	~ 300
Антикоррозийная обработка	Да
Ток с генератора	Переменный, 3 фазы
Раб. мощность сол. панелей	200 W
Класс защиты	IP67
Мощность ветрогенератора, Вт	Российские
Удаленный мониторинг	300 W



Рисунок 3.18 – Установка АРКТИК ВС-1200 [25]

3.2.1 Понимание роли направления ветра в работе ветрогенераторов

Направление ветра играет важную роль в работе ветрогенераторов, особенно горизонтальных осевых ветрогенераторов. Однако современные установки, такие как ROSVETRO FK-20K, оснащены сложными механизмами для эффективного управления изменениями направления ветра. Эти ветрогенераторы оснащены системой поворота, которая включает хвост или другой механизм ориентации, который постоянно регулирует положение турбины так, чтобы она была обращена к ветру. Эта автоматическая настройка гарантирует, что лопасти турбины всегда находятся в оптимальном положении для захвата максимального количества энергии ветра, независимо от изменений направления ветра.

Для целей расчета потенциальной мощности ветрогенераторов с использованием данных о скорости ветра влияние направления ветра уже учтено в конструкции турбины. Например, у ROSVETRO FK-20K есть хвост, который быстро реагирует на изменения направления ветра без значительной потери скорости ротора. Это означает, что турбина может сохранять свою эффективность и мощность даже при изменении направления ветра. Сложная система поворота гарантирует, что турбина всегда будет направлена на ветер, делая компонент направления менее критичным в аналитическом контексте. Таким образом, мы можем уверенно использовать данные о скорости ветра для оценки мощности, зная, что система ориентации турбины будет компенсировать любую изменчивость направления.

Упрощая наш анализ до использования данных о скорости ветра без учета направления ветра, мы соответствуем практическим и теоретическим моделям, используемым во многих исследованиях ветряной энергии. Этот подход предполагает, что система поворота турбины эффективно поддерживает оптимальное выравнивание с ветром. Хотя данные о направлении ветра могут предоставить дополнительные сведения, основным фактором генерации мощности является скорость ветра, особенно с учетом способности турбины самоориентироваться. Это упрощение позволяет нам сосредоточиться на самом важном переменном — скорости ветра, в то время как встроенные возможности турбины позволяют справляться с изменениями направления.

В заключение, учитывая передовые конструктивные особенности современных ВЭУ, направление ветра становится второстепенным фактором. Способность турбины автоматически настраиваться к изменениям направления ветра гарантирует ее эффективную работу, что подтверждает наш подход к фокусировке на скорости ветра при расчетах мощности.

3.2.2 Анализ ветровых данных для района Норильска

В этом исследовании мы провели анализ ветровых условий и потенциала генерации электроэнергии для двух типов ветрогенераторов в районе Норильска. Данные были получены из ERA5 и обработаны для визуализации пространственного распределения средней скорости ветра и средней мощности ветрогенераторов на высоте 10 м и 100 м.

Получение данных: Данные ветра на высотах 10 м и 100 м были загружены и объединены с использованием библиотеки хаттау. Компоненты ветра u и v были преобразованы в скорость ветра с использованием формулы:

$$\text{Скорость ветра} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Расчет мощности: Мощность генерации для двух типов ветрогенераторов была рассчитана с использованием формулы:

$$P = 12 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

$$P = 12 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

Где: ρ — плотность воздуха (1.225 кг/м³), A — площадь, ометаемая лопастями,

v — скорость ветра, C_p — коэффициент мощности.

На представленных графиках показаны результаты анализа скорости ветра на высоте 10 м и 100 м (рис 3.19, рис 3.20)

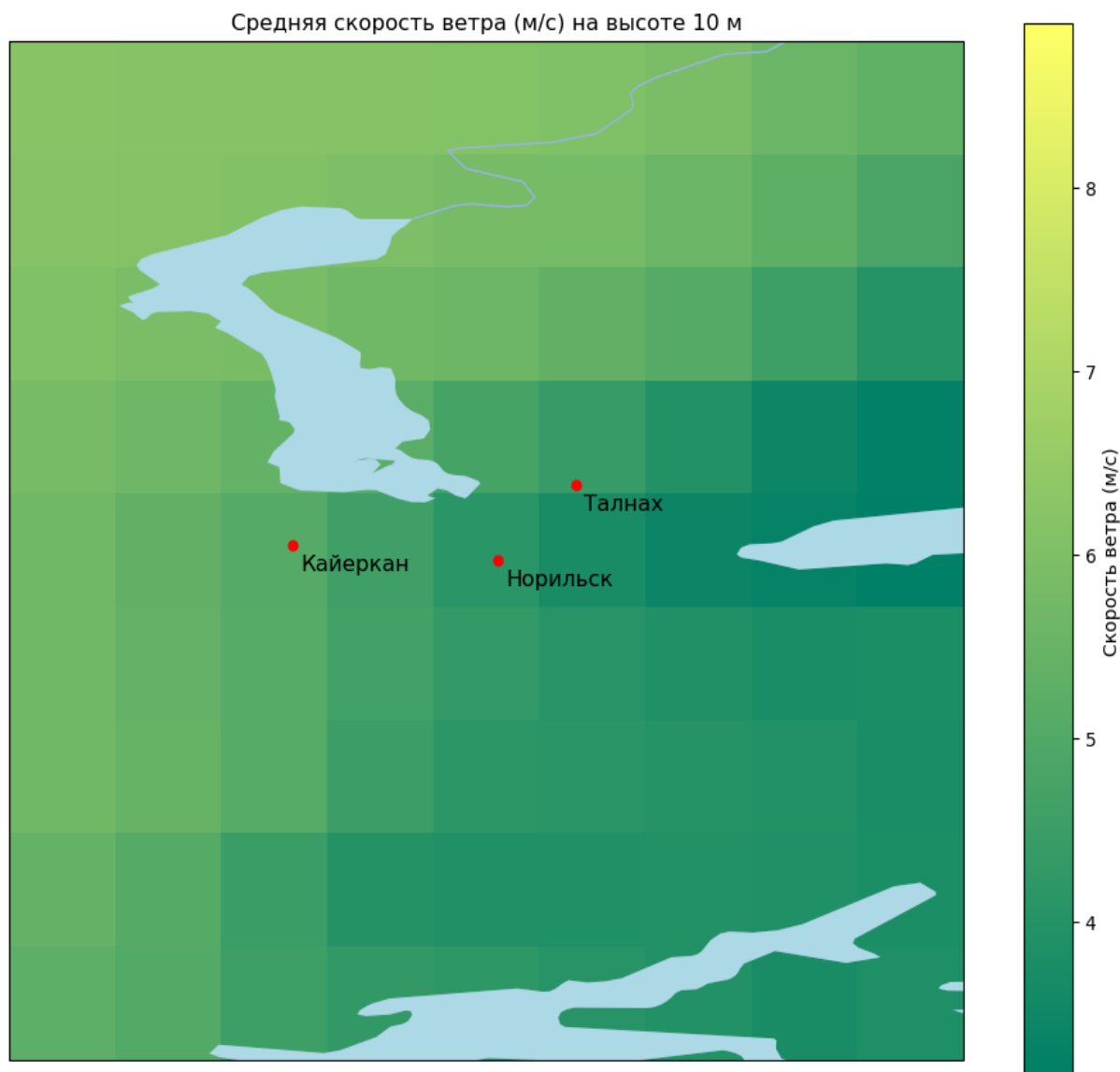


Рисунок 3.19 – Средняя скорость ветра на высоте 10 м:

Анализируя полученный результат можно сделать вывод, что диапазон скоростей ветра в районе Норильска варьируется от 4 до 8 м/с.

В районе Талнаха и Норильска скорости ветра составляют в среднем 6-7 м/с.

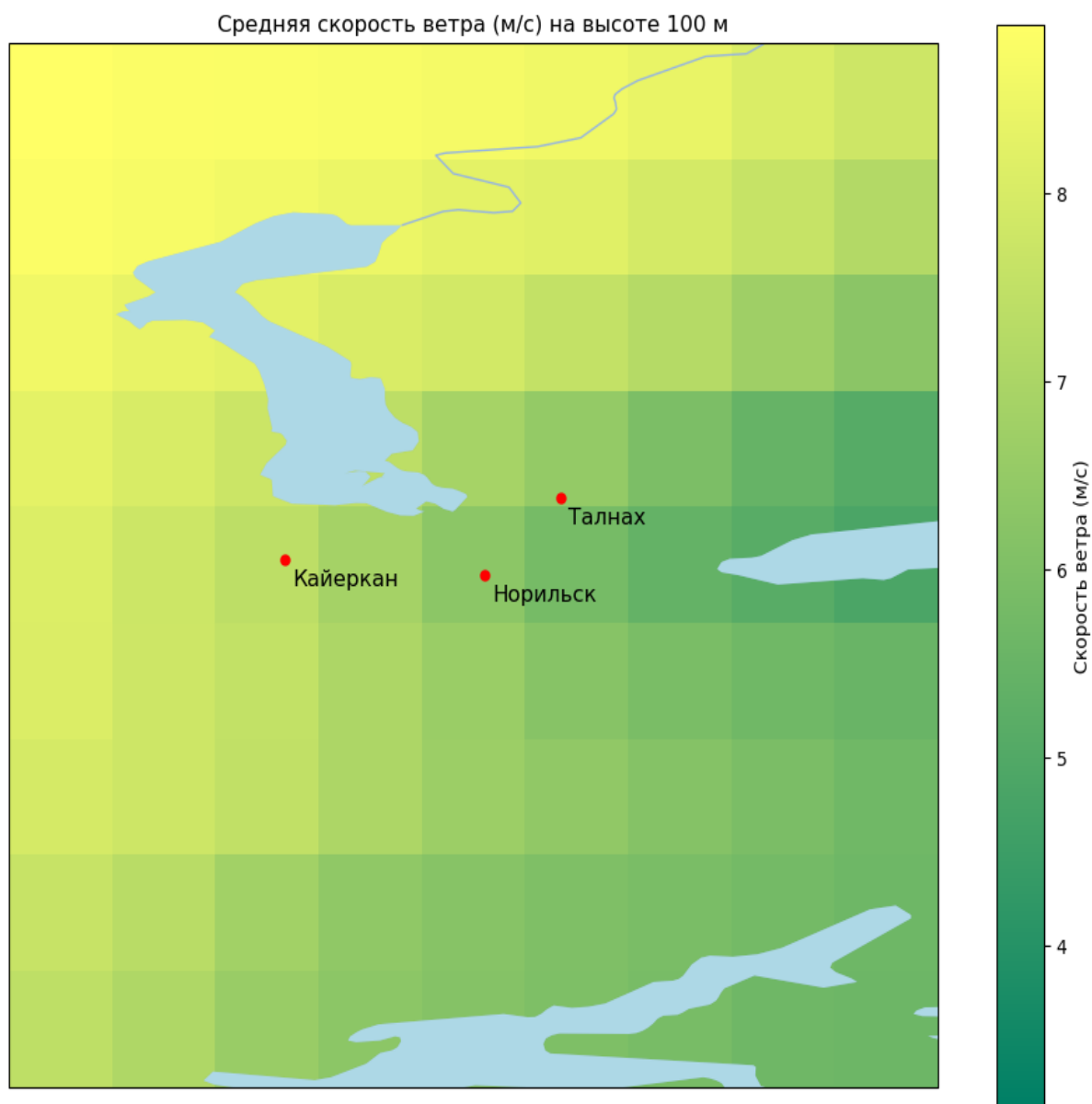


Рисунок 3.20 – Средняя скорость ветра на высоте 100 м

Исходя из полученного результата графика Средняя скорость ветра на высоте 100 м можно сделать вывод, скорость ветра на высоте 100 м выше и составляет 5-8 м/с. Наиболее высокие скорости ветра наблюдаются на северо-востоке региона.

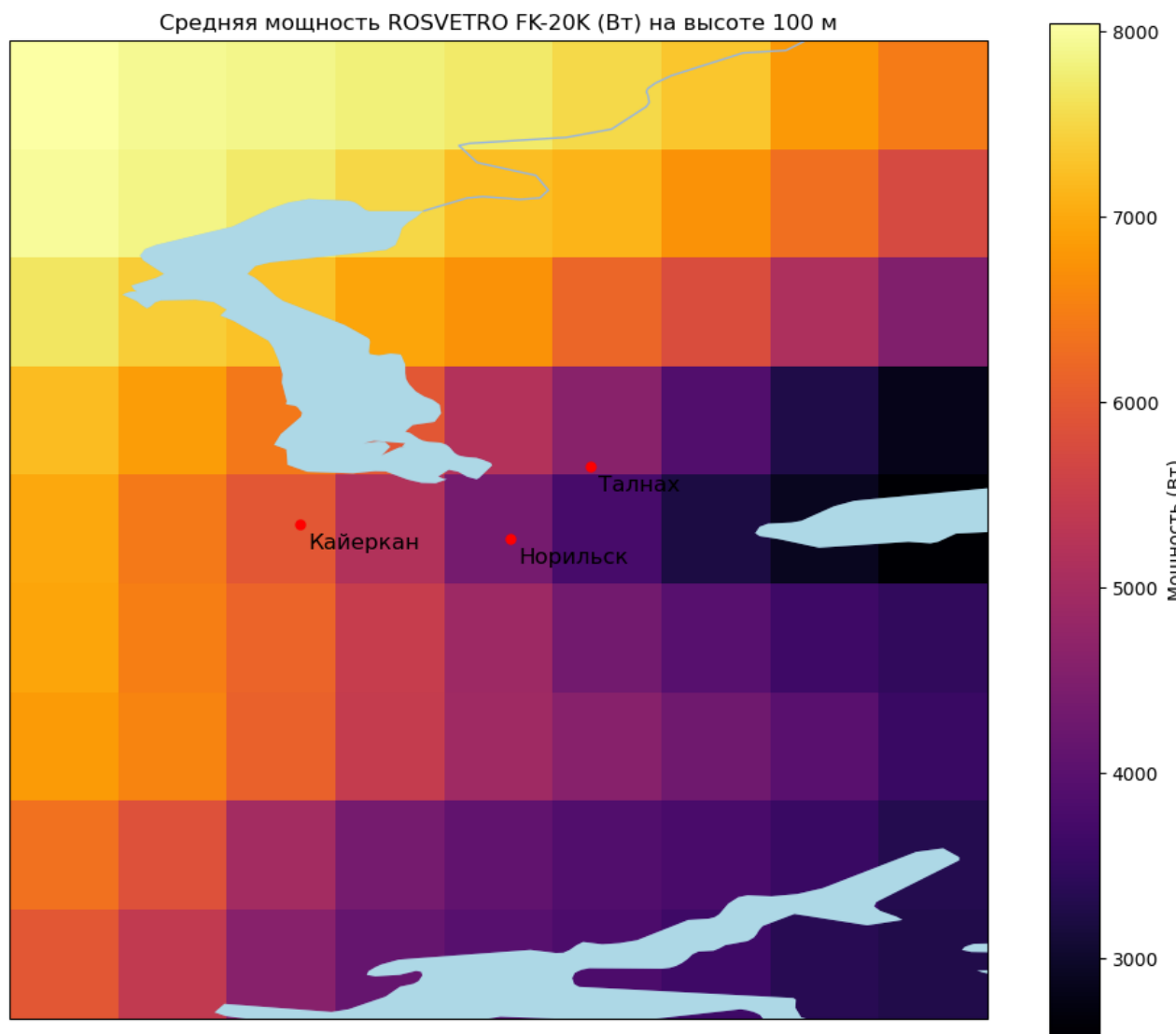


Рисунок 3.19 – Средняя мощность генерации для ROSVETRO FK-20K на высоте 100 м

Мощность генерации варьируется от 3000 до 8000 Вт. В районе Талнаха и Норильска мощность генерации ниже по сравнению с северо-востоком региона, где она достигает до 8000 Вт.

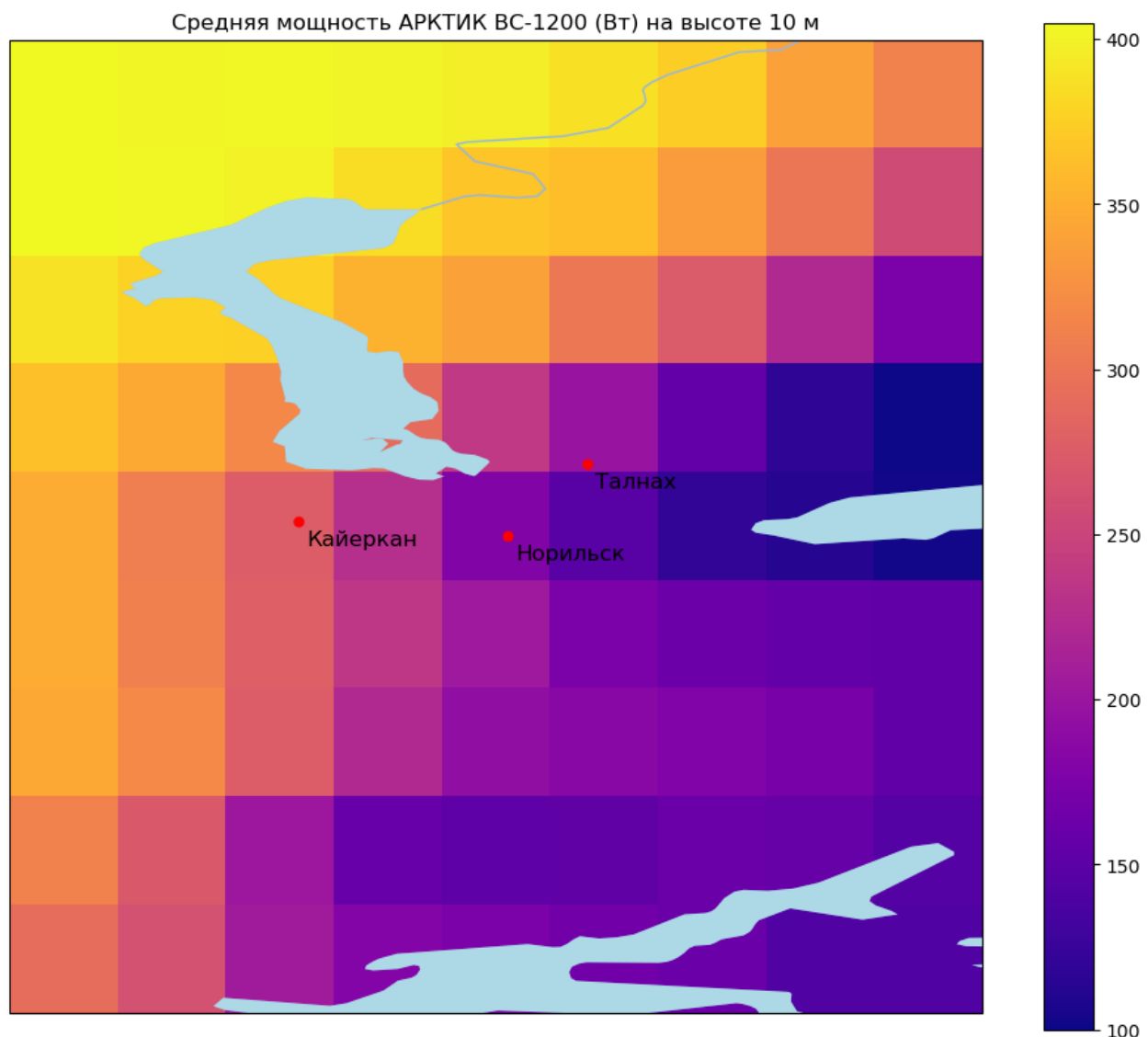


Рисунок 3.19 – Средняя мощность генерации для АРКТИК ВС-1200 на высоте 10 м

Мощность генерации варьируется от 100 до 400 Вт. В районе Талнаха и Норильска мощность генерации составляет около 200-300 Вт.

Результаты анализа показывают, что скорость ветра значительно выше на высоте 100 м по сравнению с 10 м, что подтверждает необходимость установки высоких мачт для максимального использования ветрового потенциала.

В районе Талнаха и Норильска, несмотря на относительно высокие скорости ветра, мощности генерации ветрогенераторов значительно ниже максимальных значений, что может быть связано с изменчивостью ветра и ограничениями мощности ветрогенераторов.

На северо-востоке региона наблюдается наибольший потенциал для ветроэнергетики, что делает его перспективным для установки крупных ветрогенераторов.

Анализ ветровых данных для района Норильска показал значительные различия в скорости ветра на различных высотах и местоположениях. Результаты подчеркивают важность выбора подходящего места и высоты установки ветрогенераторов для оптимального использования ветрового потенциала. В частности, северо-восток региона представляется наиболее перспективным для развития ветроэнергетики.

Эти данные и анализ могут служить основой для дальнейшего планирования и оптимизации ветроэнергетических проектов в районе Норильска.

В данном анализе рассматривается средняя почасовая мощность двух типов ветрогенераторов — горизонтально-осевого ROSVETRO FK-20K и вертикально-осевого АРКТИК ВС-1200 — в двух точках: наиболее северо-западная точка региона и город Норильск. Анализ проводится для оценки производительности ветрогенераторов в зависимости от времени суток.

3.2.3 Анализ средней почасовой мощности

Для анализа средней почасовой мощности были построены графики потенциально вырабатываемой мощности для двух ветрогенераторов график 3.10 и график 3.11

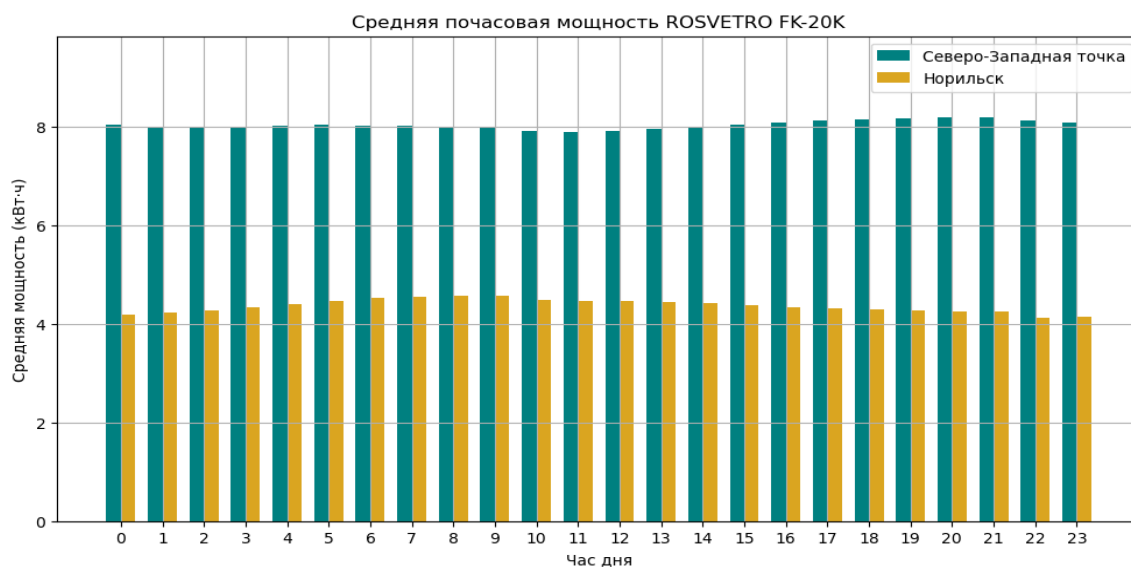


График 3.10 – Средняя почасовая мощность ROSVETRO FK-20K

На северо-западной точке мощность практически не изменяется в течение суток, оставаясь на уровне около 8 кВт·ч. Это может указывать на стабильные ветровые условия в этой точке.

В Норильске наблюдаются незначительные колебания мощности в течение суток, с небольшими пиками в утренние и дневные часы. Средняя мощность составляет около 4 кВт·ч, что несколько ниже, чем на северо-западной точке.

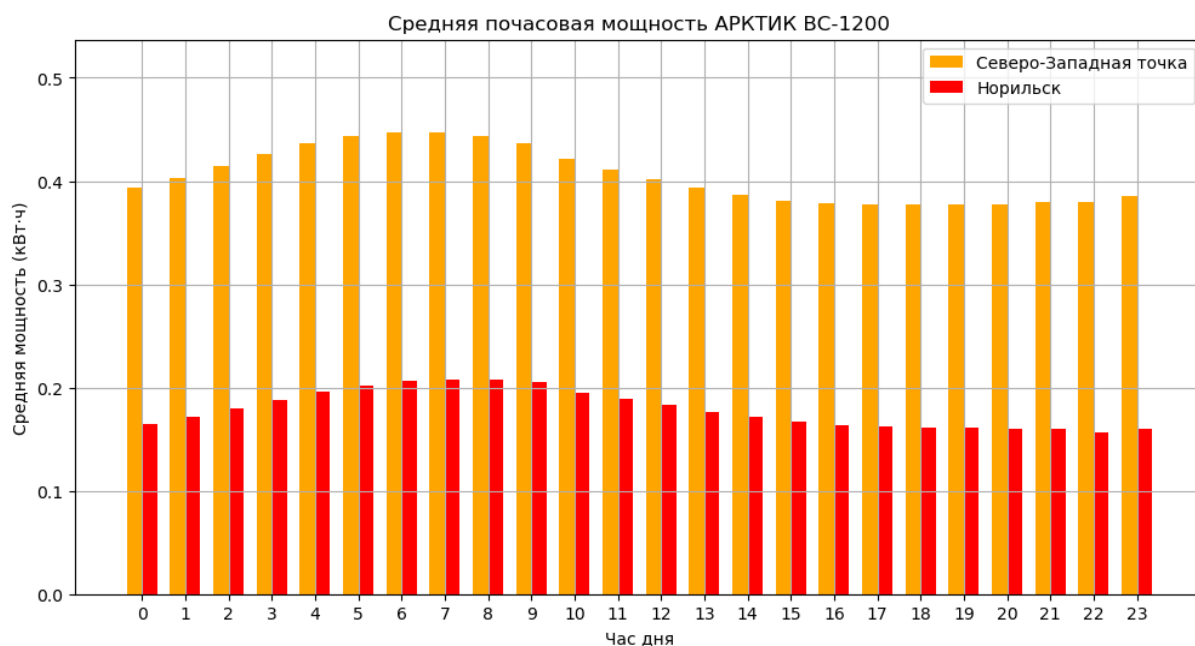


График 3.11 – Средняя почасовая мощность АРКТИК ВС-1200

Средняя мощность ветрогенератора АРКТИК ВС-1200 на северо-западной точке варьируется от 0.35 до 0.45 кВт·ч, достигая максимума в утренние часы и уменьшаясь к вечеру. Это также указывает на достаточно стабильные ветровые условия.

В Норильске средняя мощность АРКТИК ВС-1200 колеблется от 0.15 до 0.25 кВт·ч, с более выраженными пиками в утренние и дневные часы. Это указывает на большее влияние временных изменений ветра в городской среде.

Почасовой анализ мощности ветрогенераторов показал, что для обоих типов ветрогенераторов в северо-западной точке наблюдается более стабильное распределение мощности в течение суток по сравнению с Норильском. Это может быть связано с различиями в ландшафте и городской инфраструктуре, влияющими на скорость и направление ветра.

В данном анализе рассматривается месячная суммарная средняя мощность двух типов ветрогенераторов — горизонтально-осевого ROSVETRO FK-20K и вертикально-осевого АРКТИК ВС-1200 — в двух точках: наиболее северо-западная точка региона и город Норильск. Анализ проводится для оценки сезонных изменений в производительности ветрогенераторов.

3.2.4 Анализ средней суммарной месячной мощность

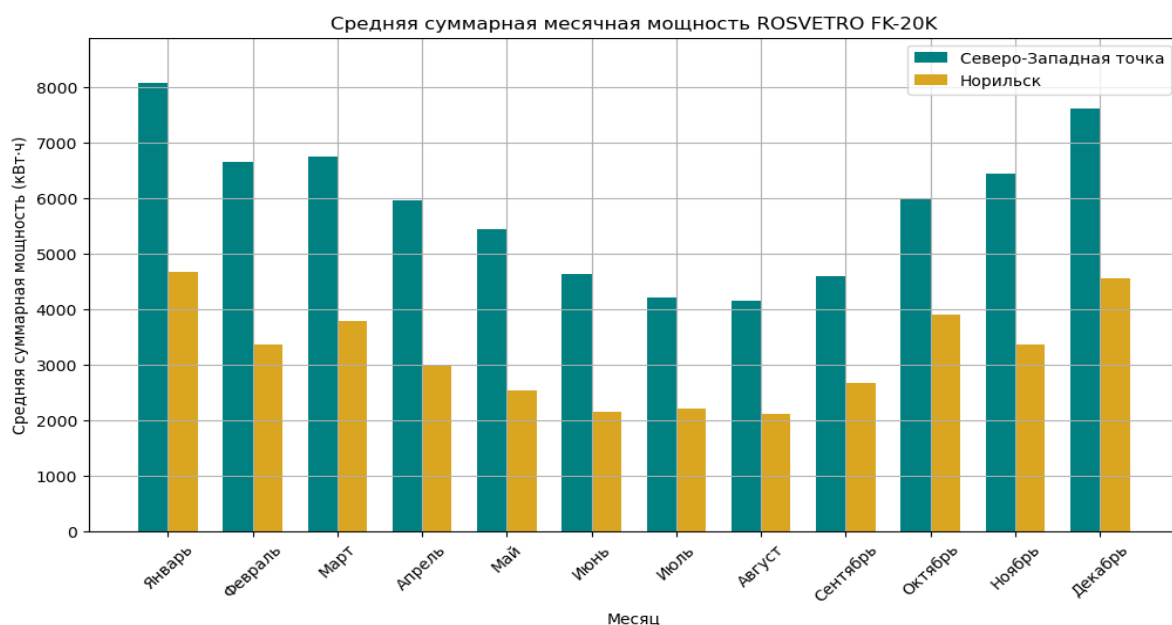


График 3.12 – Средняя суммарная месячная мощность ROSVETRO FK-20K

На северо-западной точке наблюдается высокая мощность в зимние месяцы, особенно в январе, когда она достигает пика около 8000 кВт·ч. Летние месяцы характеризуются снижением мощности до 4000-5000 кВт·ч.

В Норильске мощность также выше зимой, но её значения ниже, чем на северо-западной точке, с пиками в районе 5000 кВт·ч в январе и декабре. Летом мощность снижается до 2000-3000 кВт·ч.

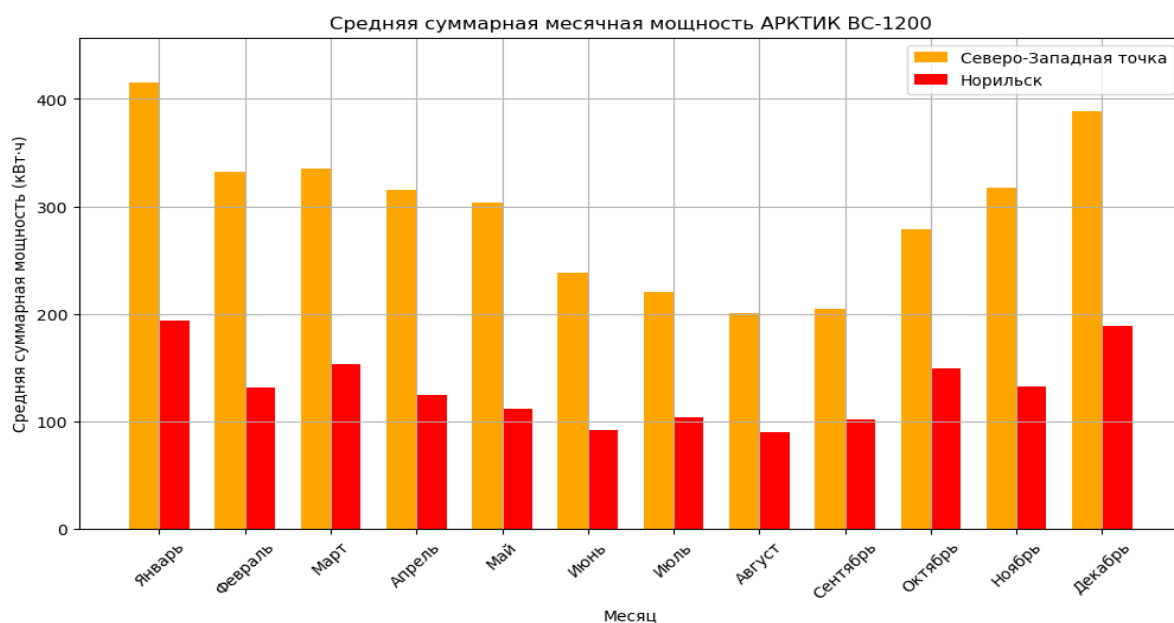


График 3.13 – Средняя суммарная месячная мощность АРКТИК ВС-1200

Для АРКТИК ВС-1200 на северо-западной точке также наблюдается высокая мощность в зимние месяцы, с пиком в январе около 400 кВт·ч. Летом мощность снижается до 200 кВт·ч.

В Норильске мощность ветрогенератора АРКТИК ВС-1200 значительно ниже, с максимумом около 200 кВт·ч в зимние месяцы и минимумами около 90-110 кВт·ч летом.

Месячный анализ мощности ветрогенераторов показал, что для обоих типов ветрогенераторов на северо-западной точке и в Норильске наблюдаются сезонные изменения в производительности. Зимой мощность значительно выше, что может быть связано с более сильными и устойчивыми ветрами в этот период. Летом мощность снижается, отражая сезонные изменения ветровой активности.

3.2.5 Анализ суммарной годовой мощности

В данном анализе рассматривается годовая суммарная мощность двух типов ветрогенераторов — горизонтально-осевого ROSVETRO FK-20K и вертикально-осевого АРКТИК ВС-1200 — в двух точках: наиболее северо-западная точка региона и город Норильск. Анализ проводится для оценки долгосрочных изменений в производительности ветрогенераторов.

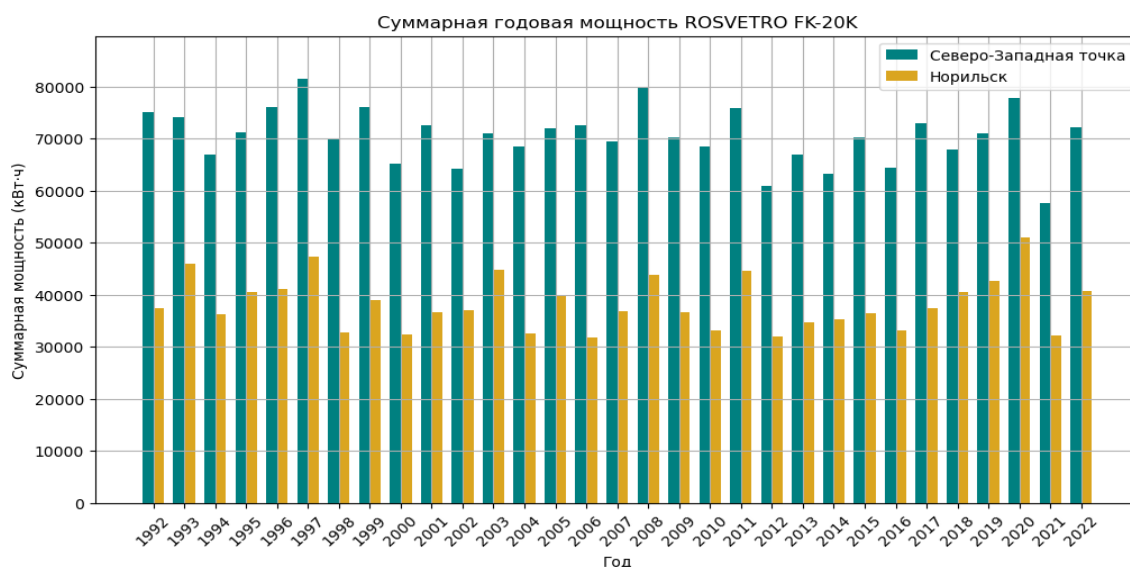


График 3.14 – Суммарная годовая мощность ROSVETRO FK-20K

На северо-западной точке мощность колеблется в пределах от 60 000 до 80 000 кВт·ч, показывая относительно стабильные значения на протяжении многих лет.

В Норильске годовая мощность также демонстрирует стабильность, но на более низком уровне — от 30 000 до 50 000 кВт·ч. Это подтверждает наблюдения о том, что в Норильске ветровая активность несколько ниже по сравнению с северо-западной точкой.

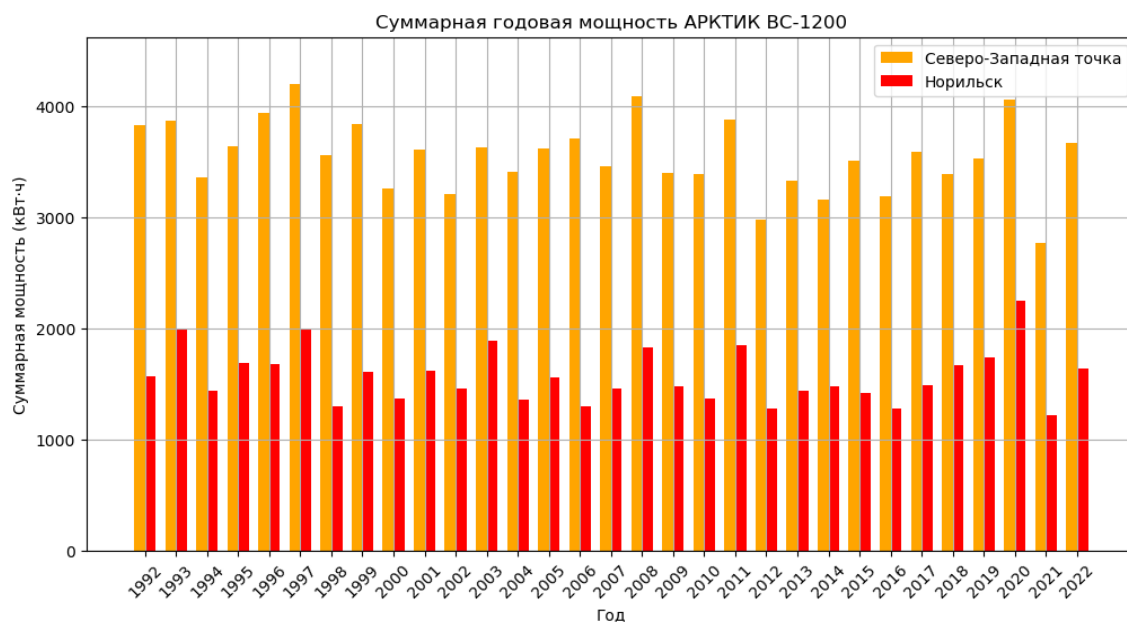


График 3.15 – Суммарная годовая мощность АРКТИК ВС-1200

Для АРКТИК ВС-1200 на северо-западной точке мощность колеблется от 3000 до 4500 кВт·ч. В Норильске годовая мощность значительно ниже и варьируется от 1000 до 2000 кВт·ч.

Годовой анализ мощности ветрогенераторов показал, что для обоих типов ветрогенераторов на северо-западной точке и в Норильске наблюдаются относительно стабильные значения мощности на протяжении многих лет.

В данном анализе была исследована мощность двух типов ветрогенераторов — горизонтально-осевого ROSVETRO FK-20K и вертикально-осевого АРКТИК ВС-1200 — в двух точках: наиболее северо-западная точка региона и город Норильск. Рассматривались почасовые, месячные и годовые данные для оценки эффективности и различий в производительности ветрогенераторов.

Анализ показал, что ветрогенераторы ROSVETRO FK-20K имеют более высокую мощность по сравнению с АРКТИК ВС-1200 в обеих точках наблюдений.

Наиболее стабильные и высокие показатели мощности наблюдаются на северо-западной точке для обоих типов ветрогенераторов, что свидетельствует о более благоприятных ветровых условиях в этом регионе по сравнению с Норильском.

В Норильске показатели мощности ниже, что может быть связано с городскими условиями и возможным влиянием городской застройки на ветровой режим.

Для оптимизации использования ветрогенераторов рекомендуется учитывать выявленные различия в производительности в зависимости от местоположения. Северо-западные районы могут быть более подходящими для установки ветрогенераторов за счет более стабильных ветровых условий.

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОТРАСИ

4.1 Потенциальное воздействие на конструкцию ветроустановок

Анализ ветровых условий в районе Норильска выявил несколько ключевых аспектов, которые могут существенно повлиять на конструкцию ветроустановок. Основные выводы включают:

Высокая средняя скорость ветра на северо-западе региона:

Северо-западные части региона характеризуются высокой средней скоростью ветра, достигающей 8.5 м/с. Это означает, что ветроустановки, размещенные в этих районах, будут подвергаться постоянному воздействию сильного ветра, что требует усиленной конструкции для обеспечения долговечности и надежности.

Экстремальные ветровые события:

- Частота и интенсивность экстремальных ветровых событий в регионе также являются важными факторами. Высокие скорости ветра, достигающие 30 м/с, требуют особого внимания при проектировании турбин, чтобы они могли выдерживать такие нагрузки без повреждений.

Изменчивость ветровых условий:

- Значительные сезонные и межгодовые вариации скорости и направления ветра требуют гибкости в конструкциях турбин. Это может включать в себя использование регулируемых по высоте башен и адаптивных систем управления для оптимальной работы в различных условиях.

Рекомендации по характеристикам ветроустановок для противостояния экстремальным событиям

На основании проведенного анализа, можно сделать несколько рекомендаций по характеристикам ветроустановок, которые помогут им противостоять экстремальным ветровым условиям в районе Норильска:

1. Прочная конструкция и материалы:

- Турбины должны быть изготовлены из высокопрочных материалов, способных выдерживать высокие ветровые нагрузки. Это может включать использование композитных материалов для лопастей и стальных конструкций для башен.

2. Аэродинамический дизайн лопастей:

- Лопасти турбин должны иметь аэродинамический дизайн, который минимизирует воздействие экстремальных ветров и уменьшает вероятность структурных повреждений. Это может включать в себя использование более коротких лопастей или лопастей с возможностью регулировки угла атаки.

3. Регулируемые башни:

- Башни турбин с возможностью регулировки высоты могут помочь адаптироваться к изменчивым ветровым условиям и минимизировать влияние турбулентных потоков, особенно в районах с разнообразным рельефом.

4. Системы активного управления:

- Ветроустановки должны быть оснащены системами активного управления, которые могут изменять ориентацию лопастей и башни в зависимости от текущих ветровых условий. Это поможет оптимизировать выработку энергии и защитить турбины от повреждений в условиях сильного ветра.

5. Усиленные системы крепления:

- Особое внимание должно быть уделено системам крепления турбин к основаниям. Учитывая высокую частоту экстремальных ветровых событий, важно обеспечить стабильность и прочность креплений, чтобы избежать сдвигов и разрушений конструкции.

Проектирование ветроустановок для района Норильска требует учета специфических ветровых условий, включая высокую среднюю скорость ветра и частые экстремальные события. Применение вышеуказанных рекомендаций поможет создать надежные и эффективные ветроустановки, способные выдерживать суровые климатические условия региона и обеспечивать стабильную выработку энергии.

4.2 Ключевые характеристики важные для проектирования и эксплуатации ветроустановок

В результате проведенного анализа ветровых условий в районе Норильска были выявлены ключевые характеристики, важные для проектирования и эксплуатации ветроустановок:

1. Средняя скорость ветра:

Северо-западные части региона демонстрируют высокую среднюю скорость ветра, достигающую 8.5 м/с, что делает их перспективными для размещения ветроустановок.

2. Экстремальные ветровые события:

Частота и интенсивность экстремальных ветровых событий варьируются по региону. Наиболее высокие скорости ветра (до 30 м/с) наблюдаются в северо-западной части, что требует усиленной конструкции ветроустановок для обеспечения их долговечности и надежности.

3. Пространственное распределение ветровых условий:

Анализ показал значительные различия в скорости и направлении ветра в зависимости от местоположения. Это подчеркивает необходимость детального планирования при выборе мест для установки ветроустановок.

4. Сезонные и межгодовые вариации:

Ветровые условия подвержены значительным сезонным и межгодовым вариациям, что требует гибкости в проектировании и эксплуатации турбин.

4.3 Перспективы дальнейших исследований

Для дальнейшего развития и улучшения ветроэнергетических проектов в районе Норильска рекомендуется:

1. Расширение данных и улучшение моделей:

Сбор более детализированных данных о высоте и топографии региона позволит улучшить моделирование ветровых условий и точность прогнозов. Интеграция данных из различных источников, таких как спутниковые снимки и топографические карты, может значительно повысить качество анализа.

2. Тестирование и оптимизация конструкций ветроустановок:

Проведение полевых испытаний различных конструкций турбин в реальных условиях Норильска поможет выявить наиболее эффективные и устойчивые решения. Это включает тестирование материалов, аэродинамических характеристик лопастей и систем активного управления.

3. Разработка адаптивных систем управления:

Исследование и разработка адаптивных систем управления, которые могут оперативно реагировать на изменяющиеся ветровые условия, помогут повысить эффективность и надежность ветроустановок. Это включает в себя использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования и оптимизации работы турбин.

4. Оценка экономической целесообразности:

Анализ экономической эффективности различных вариантов размещения и конструкций ветроустановок поможет определить оптимальные решения с точки зрения затрат и ожидаемой выработки энергии.

Анализ ветровых условий в районе Норильска предоставил ценные данные, которые помогут в планировании и реализации ветроэнергетических проектов. Учитывая специфические климатические и географические особенности региона, применение рекомендованных мер позволит создать надежные и эффективные ветроустановки, способные обеспечить устойчивую выработку энергии даже в условиях сурового климата. Дальнейшие исследования и улучшение моделей позволят еще больше оптимизировать эти проекты и способствовать развитию возобновляемой энергетики в арктическом регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данная работа позволила рассмотреть важные аспекты учета динамики параметров ветра при расчете ветровых электрогенераторов для Норильска.

В ходе исследования был проведен анализ динамики параметров ветра в Норильске. Было выявлено, что ветровые условия в данном регионе характеризуются высокой вариабельностью. Изучены основные факторы, влияющие на динамику ветровых параметров, такие как рельеф местности, сезонные изменения и др.

Влияние динамики параметров ветра на работу ветровых электрогенераторов, было выявлено, что изменения скорости и направления ветра могут значительно влиять на эффективность работы ветровых электрогенераторов. Были рассмотрены различные технические решения, позволяющие учесть динамику ветровых параметров при проектировании и эксплуатации ветровых электрогенераторов.

В результате исследования были сформулированы рекомендации при использовании и проектировании ветровых электрогенераторов для Норильска. Они включают в себя необходимость учета особенностей ветровых условий в данном регионе, а также проведение экономического анализа для оценки эффективности использования технических решений.

Исследование показало, что учет динамики параметров ветра является необходимым для повышения эффективности работы ветровых электрогенераторов и может привести к экономическим выгодам. Рекомендации, сформулированные в данной работе, могут быть использованы при проектировании и эксплуатации ветровых электрогенераторов в данном регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агарков С. А. и др. Геоэкономические процессы в Арктике и развитие морских коммуникаций. – 2014. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22578376>
2. Ачитаев А. А., Бархатов К. А., Удалов С. Н. УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ И МАГНИТНЫМ ВАРИАТОРОМ // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-vetroenergeticheskoy-ustanovkoy-s-sinhronnym-generatorom-na-postoyannyh-magnitah-i-magnitnym-variatorom>
3. Багрова Т.Н. ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ОСНОВЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ» 20.18 я73 Б14. – 2019. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_5ec02163feab4ca7b8c1e0d16f1d6713.pdf
4. Гаваев А.С., Лосев Д.Я. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПРИРАЩЕНИЯ ВЕТРЯНОГО ПОТОКА ДЛЯ СПРОЕКТИРОВАННОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ОБЪЕКТ 1-У // ИВД. 2022. №11 (95). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kinematicheskikh-parametrov-sistem-prirascheniya-vetryanogo-potoka-dlya-sproektirovannogo-vetrogeneratora-obekt-1-u>

5. Горшенин А.Ю., Блохин А.В., Щука И.О. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И МЕТЕОУСЛОВИЙ ВЛИЯЮЩИХ НА ЭНЕРГОВЫРАБОТКУ // МСнМ. 2022. №3 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-harakteristik-vetroelektrostantsiy-i-meteousloviy-vliyayuschih-na-energovyработку>
6. Григораш Олег Владимирович, Корзенков Павел Геннадьевич, Кондратенко Юлия Евгеньевна К расчёту энергетического потенциала и экономической эффективности ветровой энергетики // Научный журнал КубГАУ. 2014. №100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-raschyotu-energeticheskogo-potentsiala-i-ekonomicheskoy-effektivnosti-vetrovoy-energetiki>
7. Гулиев А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЛЕВИТАЦИИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ // Вестник науки. 2023. №3 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sistemy-levitatsii-vetrogeneratora-s-vertikalnoy-osyu>
8. Дербасова Е.М. Методика оценки параметров работы гидравлического фрикционного ветрогенератора на основе фреймовой модели // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. №4 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-parametrov-raboty-gidravlicheskogo-friktsionnogo-vetrogeneratora-na-osnove-freymovoy-modeli>

- 10.Дюльдин М.В., Панфилов А.А., Столяров Н.В. Методы измерения ветрового потока при проектировании ветроэлектрических станций // Агроинженерия. 2013. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-izmereniya-vetrovogo-potoka-pri-proektirovanii-vetroelektricheskikh-stantsiy-1>
- 11.Егоров А. Н. Исследование возможности применения гибридной электростанции в Камчатском крае : дис. – Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2022. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/148251>
- 12.Елизарьева М. С. Разработка электронного сервиса для расчета экономической эффективности оборудования по производству возобновляемой энергии в частных домохозяйствах Красноярского края : дис. – Сибирский федеральный университет, 2017. URL: https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/67472/vkr_elizareva_13-09.pdf?sequence
- 13.Архив погоды РП5. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Норильске
- 14.Захаров Артём Игоревич, Чижма Сергей Николаевич МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ // Глобальная энергия. 2020. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-sistemy-upravleniya-vetrovoy-energeticheskoy-ustanovkoy-maloy-moschnosti>
- 15.Июдина Е. Влияние экологического фактора на структуру экономики // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2008. – №. 3. – С. 102-118. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ekologicheskogo-faktora-na-strukturu-ekonomiki>

- 16.Квитко Андрей Викторович, Гончаров Анатолий Андреевич Расчёт мощности и выбор основных функциональных узлов ветроэлектрической установки // Научный журнал КубГАУ. 2014. №98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyot-moschnosti-i-vybor-osnovnyh-funktsionalnyh-uzlov-vetroelektricheskoy-ustanovki>
- 17.Квитко Андрей Викторович, Хицкова Алина Олеговна Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики // Научный журнал КубГАУ. 2014. №97. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-vetra-osobennosti-raschyota-resursa-i-ekonomicheskoy-effektivnosti-vetrovoy-energetiki>
- 18.Котеленко Светлана Владимировна, Чижкин Алексей Владимирович РАЗВИТИЕ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-vetrovoy-energetiki>
- 19.Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Упрощенный алгоритм расчета автономных ветродизельных электростанций с накопителями энергии // Вестник молодежной науки. 2019. №5 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uproschennyy-algoritm-rascheta-avtonomnyh-vetrodizelnyh-elektrostantsiy-s-nakopitelyami-energii>
- 20.Михаил Мокшин, Александр Путилов Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования// ЭП. 2023. №12 (191). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-vetroenergetiki-pri-proektirovanii-s-ispolzovaniem-algoritmicheskogo-modelirovaniya>

- 21.Производитель отечественных ветроустановок URL:
<https://rosvetrogenerator.ru/products/rosvetro-fk-20k.html>
- 22.Производитель отечественных ветроустановок URL:
<https://rosvetrogenerator.ru/products/arktik-vs-1200.html>
- 23.Оленьков Валентин Данилович, Тазеев Наиль Тимурович Расчет ветровых нагрузок с учетом локальных изменений скорости ветра в застройке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2019. №4. URL:
<https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-vetrovyh-nagruzok-s-uchetom-lokalnyh-izmeneniy-skorosti-vetra-v-zastroyke>
- 24.Пензин Алексей Сергеевич, Богомолов Алексей Иванович, Муйземнек Александр Юрьевич Расчет ветровой нагрузки на артиллерийское вооружение, эксплуатируемое в арктических условиях // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2018. №1 (45). URL:
<https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-vetrovoy-nagruzki-na-artilleriyskoe-vooruzhenie-ekspluatiruемое-v-arkticheskikh-usloviyah>
- 25.Перепечкина М. А. Совершенствование спроса на электроэнергию (на примере ПАО Красноярскэнергосбыт) : дис. – Сибирский федеральный университет, 2017. URL: https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/68251/020_38.03.01.02_perepechkina_m.a._s_i_zyatiyami.pdf?sequence
- 26.Петров И. В., Снижко Е. А. СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТОВ // НАУЧНОЕ СООБЩЕСТВО СТУДЕНТОВ XXI СТОЛЕТИЯ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. – 2020. – С. 57-61. URL:
[https://sibac.info/archive/technic/12\(95\).pdf#page=58](https://sibac.info/archive/technic/12(95).pdf#page=58)