



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 микроклиматической изменчивости режима ветра для
ветроэнергетики»

Исполнитель Егорова Валерия Павловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Абанников Виктор Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

« 10 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление	
Введение.....	2
Глава 1. Микроклиматология и роль физико-географических особенностей в формировании микроклимата ветра в Архангельской области.....	3
1.1. Масштабы климата и роль деятельной поверхности в формировании микроклимата.....	3
1.2. Физико-географические особенности Архангельской области.....	6
1.3. Особенности формирования микроклимата ветра.....	11
Глава 2. Метеорологический режим ветровых характеристик.....	14
2.1. Особенности атмосферной циркуляции в Архангельской области.....	14
2.2. Расчет режимных характеристик ветра.....	16
2.3. Повторяемость скоростей ветра в различных диапазонах и анализ розы ветров.....	30
Глава 3. Микроклиматический режим ветра и его роль в увеличении ветроэнергетических характеристик в Архангельской области.....	42
3.1. Анализ влияние неоднородностей подстилающей поверхности на режим ветра.....	42
3.2. Расчет кадастровых ветроэнергетических характеристик.....	44
3.3. Микроклиматическая интерпретация ветроэнергетических показателей для холмистого рельефа Архангельской области.....	47
Список литературы.....	52

Введение

Архангельская область, расположенная на севере Европейской части России, характеризуется суровыми климатическими условиями, удаленностью населенных пунктов от централизованных энергосистем и высокой стоимостью доставки традиционного топлива. Эти факторы делают проблему устойчивого энергоснабжения критически важной. Ветроэнергетика, как возобновляемый источник энергии, представляет собой перспективное решение, особенно в контексте локального энергоснабжения. Однако эффективное использование ветрового потенциала требует глубокого изучения не только общерегиональных климатических характеристик, но и микроклиматических особенностей, формируемых физико-географическими факторами.

Актуальность темы заключается в том, что для успешного проектирования и размещения ветроэнергетических установок необходимо учитывать локальные микроклиматические особенности, которые могут существенно влиять на распределение скоростей и направлений ветра. Это особенно важно в условиях Архангельской области, где разнообразие природных ландшафтов создаёт сложную систему воздушных потоков. Исследование позволит восполнить пробел в научных данных и предложить практические рекомендации по оптимальному выбору площадок для ветроустановок, что повысит энергоэффективность и снизит затраты на внедрение возобновляемых источников энергии в регионе.

Целью работы является оценка микроклиматической изменчивости режима ветра в Архангельской области для выявления наиболее перспективных зон для использования ветровой энергии.

Задачи исследования:

- Провести анализ теоретических основ микроклиматологии, включая масштабы климата и роль деятельной поверхности в формировании ветрового микроклимата;

- Изучить физико-географические особенности Архангельской области и их влияние на формирование микроклимата ветра;
- Исследовать особенности формирования микроклимата ветра в регионе;
- Проанализировать метеорологический режим ветровых характеристик на основе данных многолетних наблюдений с 2015 по 2025 гг. с метеостанций Архангельск, Онега, Мезень, Котлас, включая сезонную и суточную изменчивость скорости ветра, повторяемость скоростей ветра в различных диапазонах, розы ветров и преобладающие направления;
- Оценить влияние неоднородностей подстилающей поверхности на режим ветра и ветроэнергетический потенциал;
- Рассчитать кадастровые ветроэнергетические характеристики для ключевых метеостанций региона;
- Провести микроклиматическую интерпретацию ветроэнергетических показателей для характерного рельефа на примере площадки в районе Котласа и разработать рекомендации по размещению ветроэнергетических установок.

Объект исследования: микроклиматические особенности ветрового режима Архангельской области.

Предмет исследования: пространственно-временная изменчивость ветровых характеристик и их ветроэнергетический потенциал.

Глава 1. Микроклиматология и роль физико-географических особенностей в формировании микроклимата ветра в Архангельской области

Ветроэнергетика является перспективной отраслью возобновляемой энергетики, которая требует изучения не только общих климатических характеристик региона, но и локальных условий, оказывающих влияние на ветровой режим. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность использования ветра как энергетического ресурса, является микроклимат, который в свою очередь формируется в приземном слое атмосферы под воздействием физических свойств подстилающей поверхности, рельефа, растительности, водоёмов. Эти условия и само понятие микроклимата будет рассмотрено дальше.

1.1. Масштабы климата и роль деятельной поверхности в формировании микроклимата

Климатические условия даже на относительно небольших территориях часто характеризуются как однородные. Однако детальный анализ показывает, что в пределах ограниченных участков — особенно в слое воздуха ниже стандартных уровней метеорологических измерений — наблюдаются существенные различия параметров атмосферы. Эти различия в первую очередь связаны с особенностями подстилающей поверхности, а как известно Земная поверхность характеризуется значительной неоднородностью. Такие локальные условия и формируют микроклимат — специфический режим метеорологических параметров на малой площади, оказывающий ощутимое влияние на биосферу, в том числе на жизнь человека и ведение различной хозяйственной деятельности. Однако климатическая система Земли обладает структурой, в которой выделяют три основных масштаба: макроклимат, мезоклимат и микроклимат.

Макроклимат охватывает обширные географические регионы и определяется глобальными циркуляционными процессами, такими как перенос воздуш-

ных масс между тропическими, умеренными и полярными широтами. К макромасштабным неоднородностям относятся горы, моря и океаны.

Мезоклимат формируется на уровне отдельных районов и регионов, учитывая влияние таких факторов, как морские и континентальные массивы, крупные водоёмы, горные системы и крупномасштабные типы подстилающей поверхности, как лес.

Микроклимат же охватывает небольшие территории, где локальные факторы существенно влияют на метеорологические условия. Для ветроэнергетики наиболее значимы микроклиматические зоны размером 100–500 метров, где наблюдаются существенные изменения скорости ветра.

В свою очередь различные формы макрорельефа обуславливают типы мезоклиматов, а в пределах различных типов мезоклиматов формируются микроклиматы с четкой суточной периодичностью притока солнечной радиации. Понимание этих масштабов критически важно для размещения ветроэнергетических установок, так как позволяет оптимизировать их расположение в пределах определенных территорий. В ниже приведенной таблице даны примерные диапазоны горизонтальных и вертикальных масштабов мезо- и микроклимата.

Таблица 1. Критерии разделения масштабов мезо- и микроклимата по Е. Н. Романовой. [1]

Неоднородности подстилающей поверхности		Масштаб возмущений		Рациональный масштаб
Тип	Размеры	Горизонтальный, м	Вертикальный, м	
Макроклимат				
Горный рельеф	Система гор	до 100	до 1000	от 1:1 500 000 до 1:2 500 000
Холмистый рельеф	Массивы более 100 км			
Реки	Ширина более 1 км			
Озера, моря, океан	Площадь зеркала более 50–100 км ²			
Почвенно-растительный покров	Массивы площадью более 100 км ²			
Большой город	Районы города			

Продолжение таблицы 1

Микроклимат				
Горный рельеф	Отдельные участки	до 10	до 100-200	от 1:10 000 до 1:1 000 000
Холмистый рельеф	Отдельные холмы			
Реки	Ширина менее 1 км			
Озера, пруды	Площадь зеркала менее 50 км ²			
Почвенно-растительный покров	Массивы площадью менее 100 км ²			
Город, поселок	Улицы, здания			

Микроклимат имеет большое значение в прикладных задачах, особенно в таких как нарастающая потребность в возобновляемых источниках энергии, проектировании жилых застроек и сельскохозяйственных объектов. Основной целью микроклиматологии является исследование процессов формирования микроклиматических условий и получение количественных показателей, пригодных для оценки конкретно взятых территорий.

Ключевую роль в формировании микроклимата играет деятельная поверхность, или активная поверхность — граница раздела между атмосферой и земной поверхностью (почва, вода, растительность), однако сложности возникают при определении границ в пределах ландшафта. Именно здесь происходят процессы энерго- и массообмена: поглощение солнечной радиации, испарение, турбулентный теплообмен. Можно сказать, что любая естественная поверхность не плоская, а имеет свои шероховатости различных форм. Свойства поверхности, такие как альбедо (способность отражать солнечный свет), теплопроводность и шероховатость, определяют распределение тепла и влаги. Водоемы, благодаря высокой теплоемкости, смягчают температурные колебания, а городские поверхности (асфальт, бетон) формируют «острова тепла» за счет накопления тепла днем и его медленной отдачи ночью.

Вертикальная структура приземного слоя также зависит от деятельной поверхности. Над шероховатыми объектами, такими как лес или городская застройка, турбулентность усиливается, что влияет на распределение ветра, температуры и влажности. Например, в лесу днем температура воздуха под пологом ниже, чем на открытой местности, из-за затенения и активного испарения. Ночью же лес сохраняет тепло дольше, снижая контрасты. В городских условиях высотные здания изменяют аэродинамику, создавая зоны застоя воздуха и усиливая загрязнение, создавая острова тепла.

1.2. Физико-географические особенности Архангельской области

Физико-географические особенности местности, такие как разнообразие форм рельефа, наличие водоёмов, тип почвы, наличие снежного покрова, растительность, создают значительные контрасты в тепло- и влагообмене между поверхностью и атмосферой, что в свою очередь влияют на метеорологический режим рассматриваемой территории. Анализ физико-географических особенностей позволяет выявить закономерности формирования ветровых потоков: рельеф создает зоны ускорения/замедления, водные объекты формируют бризовую циркуляцию, лесные массивы выступают аэродинамическими барьерами, которые в огромной степени влияют на ветроэнергетику. Даже на относительно небольших участках можно наблюдать формирование локальных метеорологических режимов, которые могут существенно отличаться друг от друга. Это объясняется разным характером взаимодействия воздуха с почвой, водой, растительностью и другими элементами подстилающей поверхности.

В ходе исследования было установлено, что для более полного понимания ветрового режима Архангельской области необходимо учитывать физико-географические особенности региона. Различные элементы подстилающей поверхности, такие как почва, водоёмы и растительность, оказывают существенное влияние на формирование воздушных потоков. Такое исследование позволит понять, как различные элементы подстилающей поверхности (почва, водоёмы,

растительность) влияют на формирование ветрового режима. Эти закономерности будут использованы в Главе 3 для оценки ветроэнергетического потенциала различных районов рассматриваемой области.

Архангельская область располагается на севере Восточно-Европейской равнины и занимает преимущественно равнинную территорию. Около 87% её площади находится в пределах Русской и Печорской плит, что обуславливает господство равнинного рельефа. Наиболее крупные геоморфологические единицы — Онего-Двинско-Мезенская и Печорская равнины. Центральные районы области занимает первая из них, а восточную часть — Печорская равнина. В западной части Онего-Двинско-Мезенской равнины распространены карстовые формы рельефа, особенно в районе Беломорско-Кулойского плато.

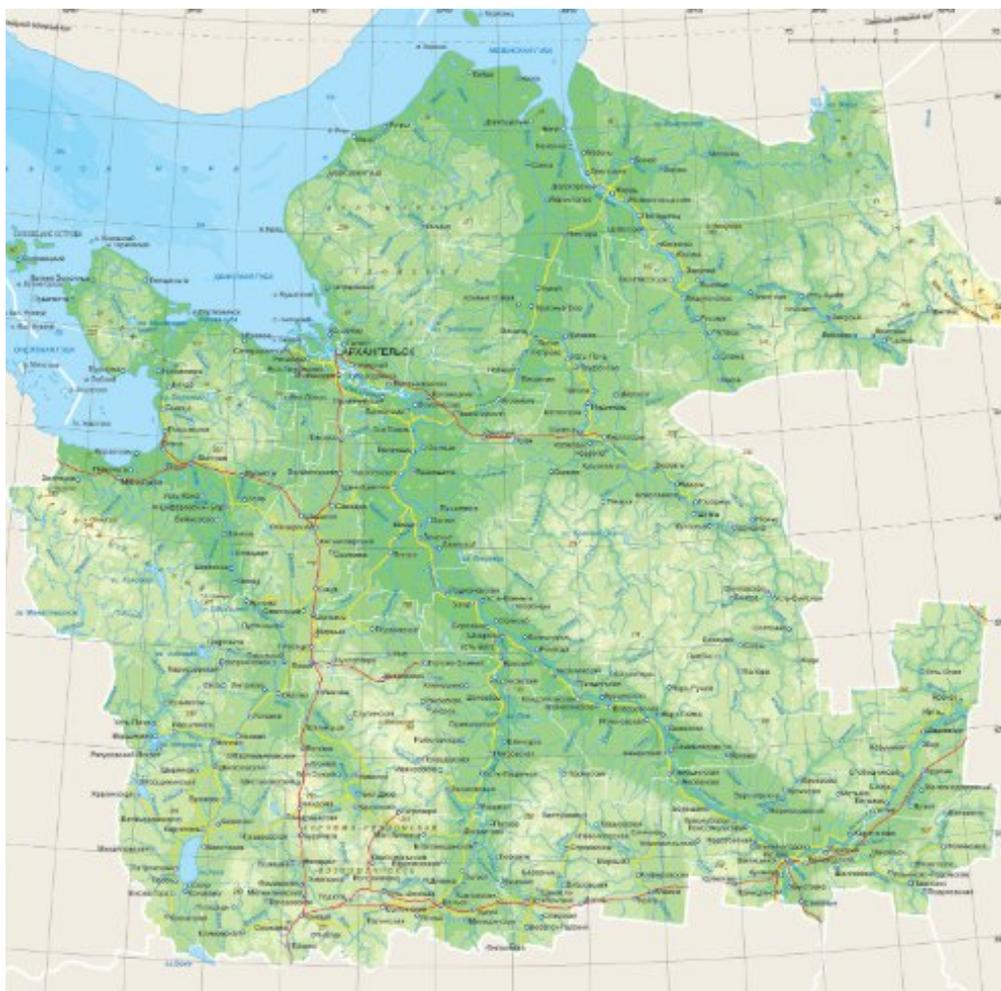


Рисунок 1. Географическая карта региона

Рельеф Архангельской области характеризуется разнообразием форм: от равнинных участков до холмистых и карстовых зон. В западной части Онего-

Двинско-Мезенской равнины распространены карстовые формы рельефа, особенно в районе Беломорско-Кулойского плато. К таким формам относятся воронки и провальные озёра, создающие сложный микрорельеф. Такие элементы рельефа способствуют канализации воздушных потоков, усиливая скорость ветра в узких ложбинах и снижая её в замкнутых впадинах.

Долина реки Печоры делит Печорскую равнину на Малоземельскую и Большеземельскую тундры. Преобладают равнинные участки, однако встречаются отдельные гряды и холмы высотой до 250 м, которые служат естественными барьерами для воздушных масс. На наветренных склонах таких возвышений наблюдается повышенная скорость ветра, а на подветренных — зоны вихревых движений, что связано с изменением направления потока и увеличением турбулентности.

На северо-западе области рельеф осложнён древними кряжами, в частности, Ветреным Поясом, входящим в состав Балтийского щита. Его максимальная высота достигает 344 м (район горы Оловгора). Эти выступающие участки создают вертикальные градиенты скорости ветра, вызывая сильные порывистые потоки в приземном слое. Подобные образования усиливают циркуляцию воздушных масс и могут быть использованы при проектировании мест установки ветроэнергетических устройств.

Тиманский кряж, расположенный южнее и восточнее, представляет собой систему параллельно вытянутых гряд, с наибольшей высотой 471 м на горе Четласский Камень, которая является самой высокой точкой материковой части области. Этот кряж играет ключевую роль в формировании регионального ветрового режима: его гряды направляют воздушные массы вдоль оси склонов, создавая естественные коридоры для ускоренного движения ветра, а на подветренной стороне — зоны пониженного давления, способствующие развитию турбулентности и конвекции.

В юго-западной части области выделяются такие формы рельефа, как Коношско-Няндомская возвышенность и Устьянское плато. Междуречье между реками Мезень и Пёза отличается обширными заболоченными низинами, где

преобладают моренные холмы. Эти элементы создают резкие контрасты в нагревании поверхности, что приводит к локальным конвекционным ветрам, особенно выраженным летом. В весенне-летний период мелкие провальные озёра и старицы усиливают микроразличия температурные различия, инициируя слабые восходящие или нисходящие потоки воздуха.

Гидрографическая сеть области хорошо развита и имеет равномерное распределение. Большинство рек принадлежит к бассейну Белого моря, среди которых крупнейшие — Северная Двина с притоками Вычегда, Пинега, Вага, а также Онега и Мезень. Реки текут преимущественно в северо-западном направлении, имеют широкие пойменные долины и спокойное течение. Широкие поймы служат естественными каналами для ветровых потоков, что может быть учтено при анализе местоположения для установки ветрогенераторов.

В верховьях рек часто встречаются гравийно-галечные перекаты и пороги, особенно в районах выходов твёрдых пород и на Тиманском кряже. Такие участки увеличивают шероховатость поверхности, что, в свою очередь, влияет на характер движения воздушных масс в прибрежных зонах, усиливая турбулентность и изменяя направление ветра.

Особое значение имеют озёра, особенно крупные, такие как Кенозеро, Лача, Ундозеро и Кожозеро, находящиеся в районе Прионежья. Они имеют ледниковое происхождение и часто группируются вдоль моренных гряд. Крупные водоёмы создают бризовые циркуляции, где днём ветер дует с воды на сушу, а ночью — обратно, что влияет на микроклимат прибрежных районов. Также в местах развития карста встречаются мелкие провальные озёра, часть из которых зарастает и превращается в болота, что дополнительно влияет на микроклиматические особенности региона.

Болота занимают значительную долю территории области — до 25% в отдельных районах, особенно в побережьях Белого моря и междуречье Онеги и Мезени. Преобладают верховые болота, питающиеся осадками. Благодаря низкой теплопроводности и высокой теплоёмкости, они замедляют нагревание и охлаждение поверхности, создавая температурные контрасты с окружающими

леса и равнинами. Это инициирует слабые конвективные ветры, особенно в утренние часы, когда разница температур становится наиболее заметной.

Леса занимают около 20 млн гектаров, что делает Архангельскую область одним из самых залесённых регионов России. Преобладают хвойные породы (ель, сосна — 86%), а мелколиственные деревья (берёза) составляют 14%, преимущественно в районах интенсивных вырубок, таких как Котласский и Коношский районы. Согласно исследованиям Айзенштадта (1995), хвойные леса снижают скорость ветра на 30–50% по сравнению с открытыми равнинами. Однако, на границах лесных массивов и в просеках возникают зоны повышенной турбулентности, где ветер усиливается.

В пределах тайги можно выделить две подзоны — северотаёжную и среднетаёжную. В северотаёжной зоне леса более разрежены и низкорослы, почвы — глеево-подзолистые. Здесь, благодаря низкой плотности насаждений, воздушные потоки сохраняют большую скорость, чем в средней тайге, где плотные лесные массивы создают зоны застоя воздуха и снижают интенсивность ветра.

Белое море оказывает значительное влияние на климатические и ветровые условия региона. Расположенное на западе области, оно соединяется с Баренцевым морем через пролив Горло. Площадь Белого моря составляет около 90 тыс. км², средняя глубина — 60 м. В него впадают основные реки региона. В прибрежных районах Белое море формирует бризовые ветры, увеличивает влажность и смягчает климат. Летом дневные бризы дуют с моря на сушу, обеспечивая охлаждение, а ночью — обратный поток. Зимой, при замерзании моря, бризовые процессы ослабевают, но лёд способствует усилению ветра вдоль побережья, особенно в узких проливах и заливах, где скорость воздушных потоков возрастает.

Физико-географические особенности Архангельской области — рельеф, гидросеть и растительность — формируют разнообразные мезоклиматические зоны, которые, в свою очередь, определяют микроклиматический ветровой режим. Эти зоны являются важным фактором при оценке ветроэнергетического

потенциала региона, поскольку позволяют выявить места с наиболее благоприятными условиями для установки малых ветрогенераторов.

1.3. Особенности формирования микроклимата ветра

Ветровой режим — это совокупность характеристик ветра, наблюдаемых в определённой местности за длительный период. Он включает в себя такие параметры, как скорость и направление ветра, повторяемость, интенсивность и сезонность. Среди всех метеорологических величин именно ветер наиболее чувствителен к изменениям подстилающей поверхности, или так называемого деятельного слоя. Даже в пределах относительно небольшой территории могут наблюдаться значительные колебания параметров ветра.

Формирование микроклимата ветра связано с воздействием как термодинамических, так и динамических факторов. Первые обусловлены неравномерным прогревом поверхности и приводят к образованию местных циркуляций, например бризов. Динамические факторы, в свою очередь, связаны с особенностями рельефа, который напрямую влияет на движение воздушных масс.

Динамическое воздействие рельефа проявляется в увеличении скорости ветра в местах сближения линий тока и её ослаблении при расхождении потоков. Усиление ветровых потоков наблюдается на вершинах холмов, на наветренных и параллельных склонах. Наблюдения Б. А. Айзенштадта показали, что на подветренных склонах формируется зона аэродинамической тени — область с пониженной скоростью ветра, слабо зависящей от скорости на наветренной стороне.[4]

Особенностью таких участков является образование завихрений с вертикальной и горизонтальной осью. Это особенно характерно для пересечённой местности.

Как подчёркивает Е. Н. Романова, географические особенности земной поверхности по их климатообразующему воздействию делятся на девять типов макрорельефа, каждый из которых формирует свой мезоклимат. В свою очередь,

микроклимат создаётся под влиянием макро- и мезомасштабных процессов. Важно учитывать, что Архангельская область, благодаря своим природным условиям, содержит почти все формы рельефа, кроме межгорных депрессий, что обуславливает разнообразие микроклиматических условий ветра.[1]

Низменные равнины (абсолютные высоты до 100 м) охватывают значительную часть региона, особенно в районах Приморской низменности, между речья Мезени и Пёзы, а также в бассейне Северной Двины. Эти территории отличаются повышенной заболоченностью, слабо выраженным дренажем, повышенной влажностью воздуха и пониженной температурой. Здесь ветровой режим, как правило, слабый и устойчивый, с выраженными микроклиматическими различиями в зависимости от степени заболоченности.

Равнинные участки (до 200 м) преобладают в центральной части Онего-Двинско-Мезенской равнины и в окрестностях Архангельска. Эти местности характеризуются сравнительно однородными условиями, но даже небольшие локальные возвышения (например, в районах Плесеца или Няндомы) могут существенно изменять ветер за счёт изменения экспозиции и шероховатости поверхности.

Холмистый рельеф (Коношский, Няндомский, Устьянский районы и Беломорско-Кулойское плато) отличается более сложной микроклиматической структурой. Высоты здесь достигают 300–400 м, а относительные превышения — до 100 м. Склоны с разной экспозицией по-разному прогреваются, а в понижениях воздуха скапливается влага, что способствует температурным инверсиям и локальной турбулентности воздушных масс. Это требует особого учёта при оценке ветроэнергетического потенциала.

Переходные формы рельефа между холмами и горами (в Мезенском и Лешуконском районах) могут рассматриваться как предгорья. Здесь возможны стоковые ветры, усиливающиеся в ночное время и при пониженных температурах. Такие явления создают дополнительные особенности микроклимата ветра.

Низкогорные участки представлены северными отрогами Тиманского края: грядами Чайцынский Камень, Тиманский Камень и Четласский Камень, где

расположена высочайшая точка материковой части области — 471 м. Эти территории обладают высокой контрастностью микроклиматических условий, что особенно важно при моделировании ветрового режима.

Плоскогорья и нагорья в материковой части области практически не встречаются, но элементы таких форм присутствуют на архипелаге Новая Земля. Здесь наблюдаются специфические ветровые режимы, обусловленные сочетанием приподнятых равнин и расчленённости долинами.

Среднегорный и горный рельеф характерен для архипелага Земля Франца-Иосифа и северной части Новой Земли, где высоты превышают 1500 м. Однако в рамках оценки ветроэнергетического потенциала материковой части региона эти территории рассматриваются как фоновый элемент.

Таким образом, особенности микроклимата ветра в Архангельской области тесно связаны с рельефом и подстилающей поверхностью. Понимание этих процессов имеет принципиальное значение при размещении и проектировании объектов ветроэнергетики, особенно в условиях высоко разнообразной и труднодоступной территории. Как отмечает Е. Н. Романова: «Географические особенности земной поверхности по их климатообразующему воздействию делятся на девять типов макрорельефа, каждый из которых создает свой мезоклимат». Как было сказано ранее в тексте, микроклимат создается под действием макро- и мезоклимата.[1]

Глава 2. Метеорологический режим ветровых характеристик

2.1. Особенности атмосферной циркуляции в Архангельской области

Архангельская область расположена в северной части Европейской России и находится под влиянием комплекса климатообразующих факторов: циркуляционных процессов, радиационного режима, географического положения и природных условий. Одной из главных особенностей является формирование климата в условиях ограниченного поступления солнечной радиации в зимнее время, влияния северных морей и интенсивного западного переноса, обеспечивающего вынос влажных морских воздушных масс с Атлантического океана: летом — более прохладных, зимой — относительно тёплых [5].

Циркуляционные процессы в значительной степени определяются широтным положением региона и его близостью к Северному Ледовитому океану. Архангельская область и прилегающий Ненецкий автономный округ находятся в зоне активной циклонической деятельности и частой смены воздушных масс, различных по месту формирования, температуре и влажности. Атмосферная циркуляция здесь нарушает широтную зональность климата и вносит неперiodические колебания в течение метеорологических элементов.

Особое влияние на климат региона оказывает приходно-расходный баланс тепла и влаги. Он зависит не только от радиационных и циркуляционных факторов, но и от характера подстилающей поверхности и рельефа. Близость Атлантического океана и Карского моря, наличие рек, озёр, болот, растительности, а также пересечённый равнинный рельеф, плавно понижающийся к северу, формируют специфические микроклиматические условия на территории области [5].

Радиационный режим во многом обусловлен географической широтой. В период с середины мая по конец июля на побережье Баренцева моря наблюдаются полярные дни, а южнее Полярного круга «белые ночи». Однако из-за высокой облачности и частых циклонов, особенно в холодное время года, количество суммарной радиации за год составляет в среднем только 60 % от возмож-

ной для этой широты. В отдельные годы оно может снижаться до 25–30 %, а в условиях антициклонической погоды — повышаться до 75–80 % [5].

Зимой на фоне устойчивого сибирского антициклона над областью преобладают северо-восточные ветры, приносящие холодный и сухой арктический воздух, что способствует формированию устойчивой морозной погоды. Вторжения атлантического воздуха в это время вызывают потепления, снегопады, а иногда даже оттепели с дождями [5]. Летом западный перенос усиливается, принося влажные и прохладные воздушные массы с Атлантики, что приводит к понижению температуры, увеличению облачности и выпадению дождей.

Значительное влияние оказывает арктический воздух, проникающий в область с севера и северо-запада, главным образом со стороны Карского моря. Он значительно суше и холоднее, чем атлантический, и вызывает в зимнее время резкое похолодание и сильные морозы, а летом — заморозки на почве и в воздухе [5]. Продвигаясь на юг, арктический воздух трансформируется, приобретая черты континентального.

Дополнительный вклад в циркуляционные процессы вносят воздушные массы из других регионов. Циклоны с районов Средиземного и Чёрного морей, хотя и встречаются реже, приносят в любое время года кратковременное потепление. Весной это может вызывать раннее вскрытие рек, а осенью — устанавливать «бабье лето». Кроме того, зимой с востока, а летом с юго-востока в область поступает сухой континентальный воздух умеренных широт: зимой он очень холодный, а летом — тёплый [5].

Весной и осенью регион находится под влиянием сменяющихся воздушных потоков. Весной усиливаются западные ветры, что сопровождается поступлением более тёплых масс, а осенью усиливается влияние северных и арктических воздушных масс, что проявляется в резком понижении температуры и увеличении осадков. Интенсивная циклоническая деятельность особенно выражена осенью и зимой, когда циклонические вихри с Атлантики сопровождаются резкими перепадами температуры, усилением ветра и обильными осадками [5].

Распределение ветра и его направлений по территории области во многом определяется сезонными особенностями давления. В холодное время года преобладает влияние исландского минимума, способствующего формированию сильных западных и юго-западных ветров. Летом общая циркуляция в северном полушарии ослабевает, в регионе начинают преобладать северные и северо-западные ветры, особенно в западной части Баренцева моря, где формируются области повышенного давления, в то время как север европейской части России находится в полосе пониженного давления, связанного с прогревом континента. [5]

Таким образом, атмосферная циркуляция в Архангельской области формируется под влиянием глобальных и региональных факторов. Основными её чертами являются высокая изменчивость, частая смена воздушных масс, сезонное усиление западного переноса, активность арктических и атлантических воздушных потоков, что в совокупности придаёт климату области нестабильный, переходный характер. Все эти особенности обуславливают сложность погодных условий региона, проявляющуюся в колебаниях температуры, неустойчивости осадков и ветрового режима.

Таким образом, особенности атмосферной циркуляции являются ключевыми факторами, определяющими пространственную и временную изменчивость ветровых характеристик в регионе. Для более полного понимания метеорологического режима Архангельской области требуется количественный анализ основных параметров ветра. Ниже в пункте 2.2. приведены расчеты, отражающие средние характеристики ветра на основе метеорологических наблюдений.

2.2. Расчет режимных характеристик ветра

Для проведения анализа метеорологических условий ветрового режима на территории Архангельской области были использованы многолетние данные наблюдений за скоростью ветра на высоте 10 метров, собранные на метеорологических станциях региона за 10-летний период.[8] Для корректной оценки ветроэнергетического потенциала критически важно анализировать не только сред-

ние значения, но и временную изменчивость параметров ветра. Представленные ниже данные позволяют выявить закономерности, существенные для проектирования ВЭУ

В рамках исследования были отобраны четыре станции, представляющие различные физико-географические зоны области — прибрежную, внутреннюю и южную части:

- 1) Архангельск — центральная часть региона, поблизости от побережья Белого моря;
- 2) Онега — западная прибрежная зона;
- 3) Мезень — северо-восточная часть области, вблизи побережья Баренцева моря;
- 4) Котлас — южная континентальная часть области.



Рисунок 2. Карта с месторасположением исследуемых станций

Метеостанция Архангельск

Метеостанция Архангельск расположена в центральной части Архангельской области, на расстоянии около 30 км от побережья Белого моря. Рельеф данной территории характеризуется большей степенью равнины с незначительными перепадами высот, что способствует относительно свободному перемещению воздушных масс. Однако, из-за высокой степени урбанизации, включая наличие плотной городской застройки, промышленных объектов и портовых сооружений, наблюдается увеличение приземной шероховатости, что замедляет скорость ветра и снижает его стабильность.

Таблица 2. Среднемесячное значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемесячное значение, м/с	2.3	2.4	2.5	2.4	2.5	2.0	1.8	1.9	2.1	2.5	2.4	2.1

Таблица 3. Среднее и максимальное значения скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Среднее значение, м/с	Максимальное, м/с
2.2	8

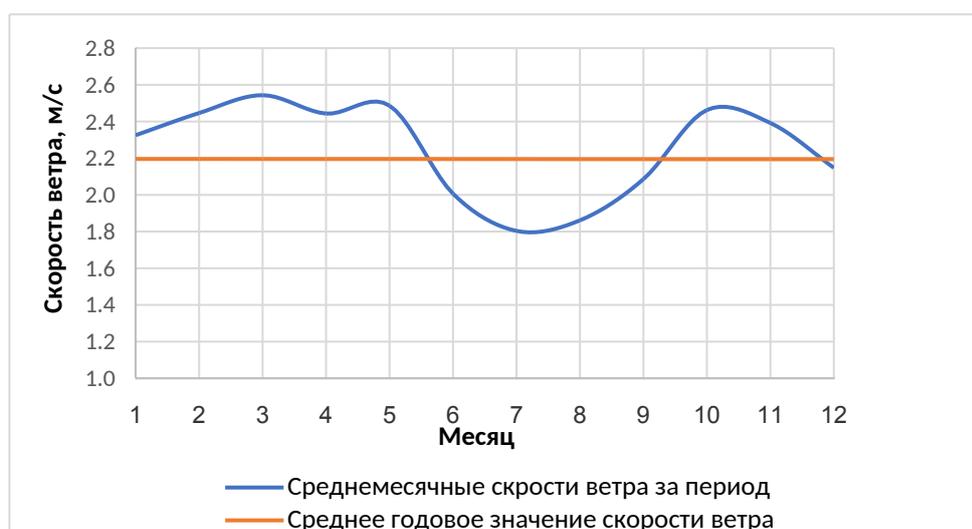


Рисунок 3. Среднемесячной скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 4. Средние значения скорости ветра по каждому сроку наблюдения за период 01.01.2015-01.01.2025

Срок наблюдения, ч	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
0:00	2.2	2.0	1.3	2.3
03:00	2.3	2.1	1.4	2.4
06:00	2.4	2.1	1.6	2.3
09:00	2.5	2.5	2.0	2.4
12:00	2.3	3.1	2.4	2.8
15:00	2.4	3.1	2.3	2.7
18:00	2.3	2.6	2.0	2.5
21:00	2.3	2.0	1.4	2.3
Среднее значение	2.3	2.4	1.8	2.5

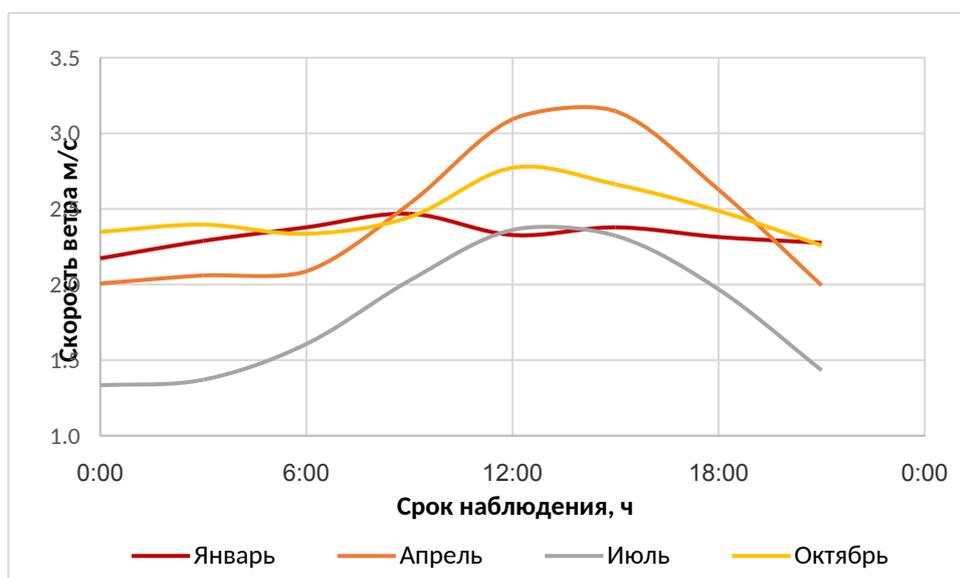


Рисунок 4. Суточный ход скоростей ветра в январе, апреле, июле, октябре за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 6. Средние значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Период	Среднее значение	Максимальное значение
01.01.2025-01.01.2024	2,6	4,0

Продолжение таблицы 6

01.01.2024-01.01.2023	2,3	5,0
01.01.2023-01.01.2022	2,2	6,0
01.01.2022-01.01.2021	2,2	7,0
01.01.2021-01.01.2020	2,1	5,0
01.01.2020-01.01.2019	2,5	5,0
01.01.2019-01.01.2018	2,4	5,0
01.01.2018-01.01.2017	2,3	5,0
01.01.2017-01.01.2016	2,5	6,0
01.01.2016-01.01.2015	2,4	5,0

Метеорологические данные за период с 01.01.2015 по 01.01.2025 год свидетельствуют о наличии выраженной сезонной изменчивости ветрового режима. Среднемесячная скорость ветра колеблется от 1.8 м/с (июль) до 2.5 м/с (март и октябрь), что позволяет говорить о более активном движении воздушных масс в весенние и осенние месяцы. Летом наблюдается снижение скорости ветра, что связано с преобладанием антициклональных условий.

Суточный ход ветра демонстрирует увеличение его скорости в утренние и дневные часы, особенно в весенний и осенний периоды. Это может быть обусловлено термическим нагревом поверхности и усилением конвекции. Таким образом, ветровой режим Архангельска характеризуется умеренной активностью, что делает его подходящим для использования малых ветроэнергетических установок. Для эффективного применения ветроэнергетики необходимо учитывать сезонные пиковые значения и планировать интеграцию с другими источниками энергии.

Метеостанция Мезень

Метеостанция Мезень расположена в северо-восточной части области, в зоне, непосредственно примыкающей к Баренцеву морю. Её географическое

положение обеспечивает сильное влияние морских воздушных потоков, что проявляется в более высоких значениях скорости ветра по сравнению с другими станциями. Рельеф в этом районе — равнинный, с минимальными перепадами высот, что способствует устойчивому формированию воздушных потоков и минимизации аэродинамического трения.

Таблица 7. Среднемесячное значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемесячное значение, м/с	3.7	3.6	3.9	3.9	3.9	3.8	3.1	3.2	3.4	3.7	3.4	3.4

Таблица 8. Среднее и максимальное значения скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Среднее значение, м/с	Максимальное, м/с
3.5	17

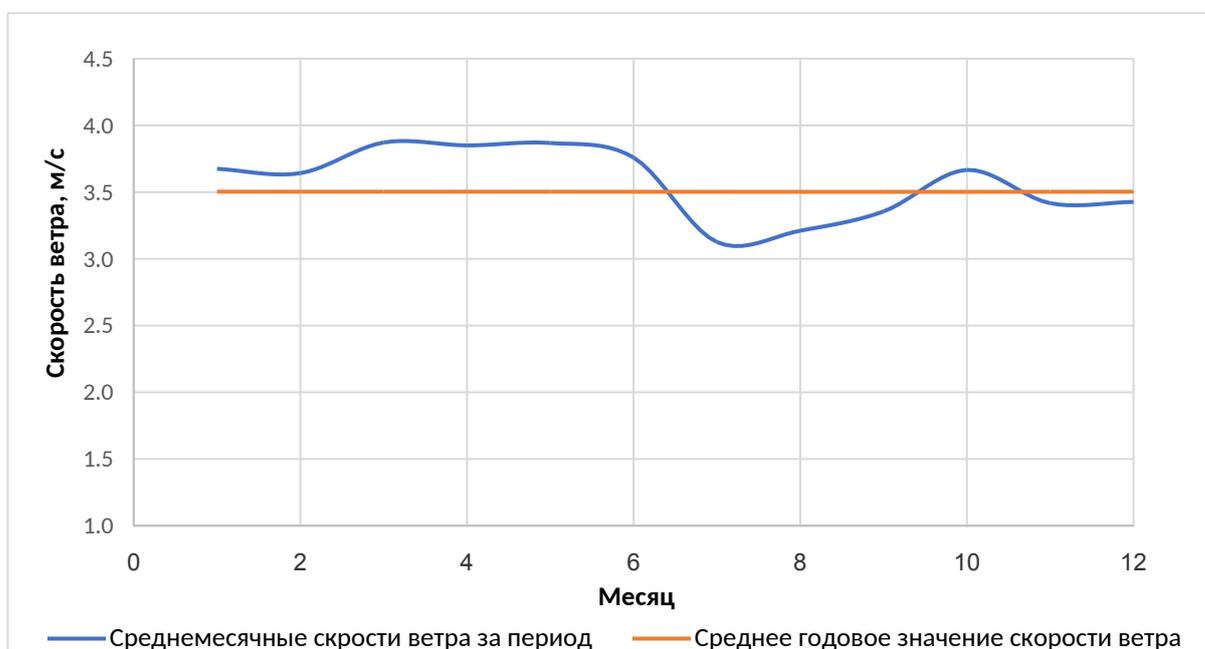


Рисунок 5. Среднемесячной скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 9. Средние значения скорости ветра по каждому сроку наблюдения за период 01.01.2015-01.01.2025

Срок наблюдения, ч	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
0:00	3.5	3.4	2.5	3.4
03:00	3.5	3.2	2.6	3.4
06:00	3.6	3.4	2.8	3.7
09:00	3.9	4.0	3.5	3.7
12:00	3.8	4.4	3.8	4.1
15:00	3.8	4.7	3.8	3.9
18:00	3.7	4.2	3.4	3.7
21:00	3.6	3.5	2.7	3.4
Среднее значение	3.7	3.9	3.1	3.7

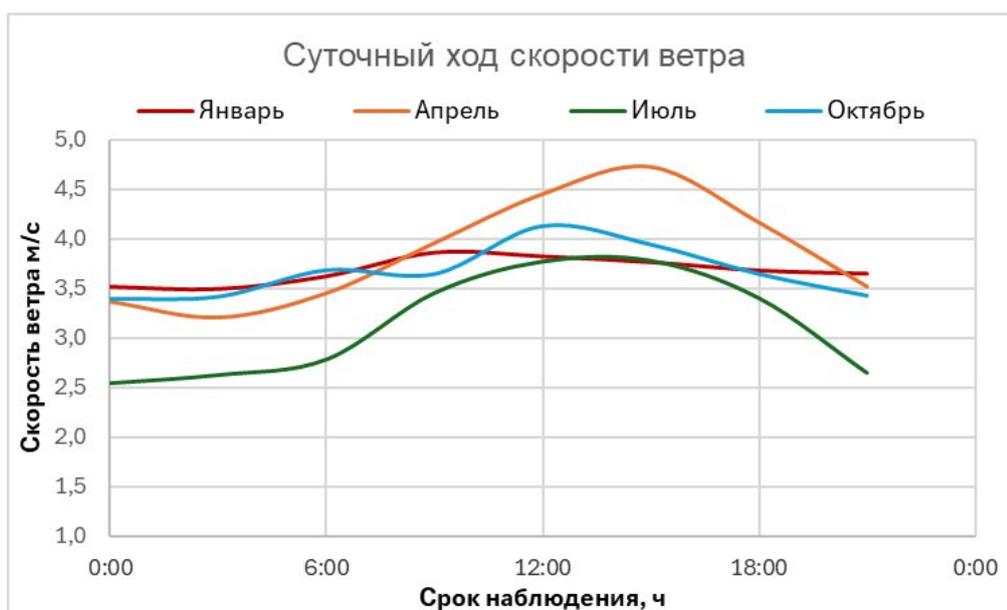


Рисунок 6. Суточный ход скоростей ветра в январе, апреле, июле, октябре за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 10. Средние значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Период	Среднее значение	Максимальное значение
01.01.2025-01.01.2024	5,0	7,0
01.01.2024-01.01.2023	3,7	13,0
01.01.2023-01.01.2022	3,4	11,0

01.01.2022-01.01.2021	3,5	17,0
01.01.2021-01.01.2020	3,3	14,0
01.01.2020-01.01.2019	3,9	12,0
01.01.2019-01.01.2018	3,8	15,0
01.01.2018-01.01.2017	3,6	13,0
01.01.2017-01.01.2016	3,9	13,0
01.01.2016-01.01.2015	3,3	14,0
01.01.2025-01.01.2024	3,7	14,0

Метеостанция Мезень, расположенная в северо-восточной части области, демонстрирует более высокую ветровую активность, чем другие станции. Среднемесячная скорость ветра достигает 3.9 м/с (март) , что указывает на благоприятные условия для ветроэнергетики. Зимой и осенью сохраняется высокий уровень ветровой активности, тогда как летом она несколько снижается, но всё ещё остается выше среднего.

Суточные изменения скорости ветра показывают равномерное распределение в течение дня, особенно в зимний период. Это говорит о том, что ветер здесь дует постоянно и предсказуемо, что положительно влияет на эффективность работы ветряных турбин. Таким образом, Мезень является одной из самых перспективных точек региона для размещения ветроэлектростанций, особенно с учётом её географического положения близко к Баренцеву морю.

Метеостанция Онега

Метеостанция Онега находится в западной части области на берегах одноимённой реки Онеги, всего в 7 км от места её впадения в Онежскую губу Белого моря. Рельеф в данном районе — преимущественно равнинный, с редкими холмами и пойменными участками рек, что позволяет воздушным потокам свободнее перемещаться, особенно в утренние и дневные часы, когда усиливается конвекция.

Таблица 11. Среднемесячное значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемесячное значение, м/с	2.4	2.4	2.6	2.5	2.7	2.2	2.1	2.1	2.4	2.5	2.6	2.1

Таблица 12. Среднее и максимальное значения скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Среднее значение, м/с	Максимальное, м/с
2.3	8

Рисунок 7. График среднемесячной скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

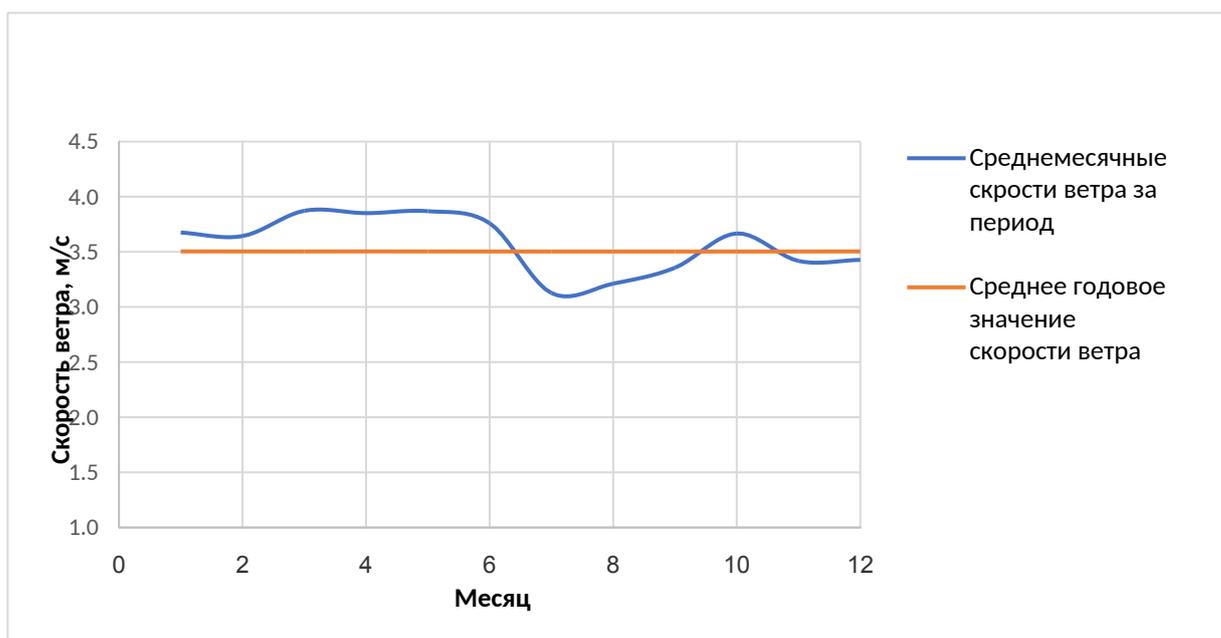


Таблица 13. Средние значения скорости ветра по каждому сроку наблюдения за период 01.01.2015-01.01.2025

Срок наблюдения, ч	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
0:00	2.4	2.1	1.6	2.4
03:00	2.4	2.0	1.5	2.3

06:00	2.5	2.0	1.7	2.5
09:00	2.6	2.5	2.2	2.5
12:00	2.4	3.	2.8	2.9
15:00	2.4	3.3	2.9	2.9
18:00	2.4	2.8	2.6	2.5
21:00	2.4	2.0	1.7	2.4
Среднее значение	2.4	2.5	2.1	2.5

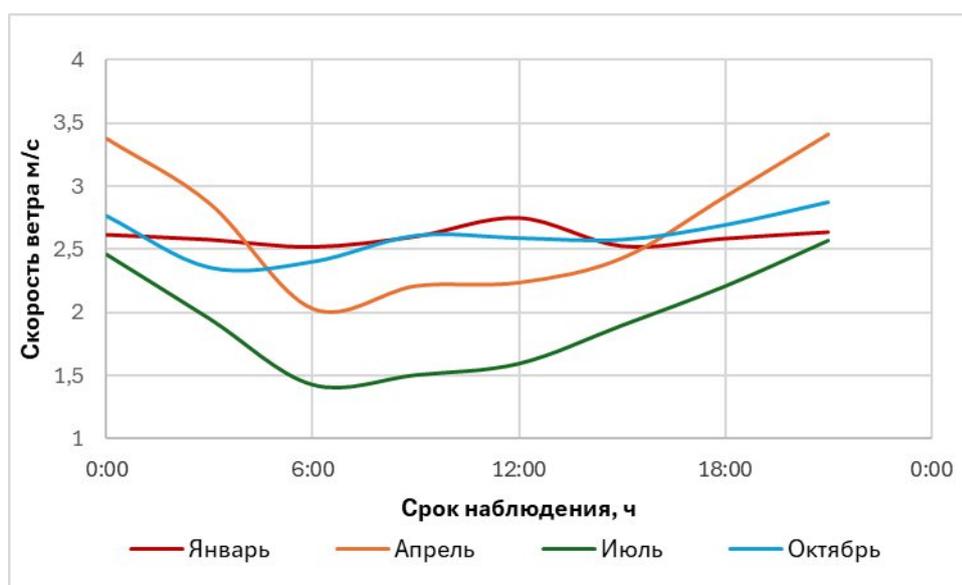


Рисунок 8. Суточный ход скоростей ветра в январе, апреле, июле, октябре за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 14. Средние значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Период	Средние значения	Максимальные значения
01.01.2025-01.01.2024	2,4	3,0
01.01.2024-01.01.2023	2,0	8,0
01.01.2023-01.01.2022	2,3	10,0
01.01.2022-01.01.2021	2,4	9,0
01.01.2021-01.01.2020	2,3	9,0
01.01.2020-01.01.2019	2,8	9,0

01.01.2019-01.01.2018	2,6	11,0
01.01.2018-01.01.2017	2,5	12,0
01.01.2017-01.01.2016	2,7	14,0
01.01.2016-01.01.2015	2,4	11,0
01.01.2025-01.01.2024	2,8	11,0

На станции Онега также выявляются сезонные различия в ветровом режиме. Среднемесячная скорость ветра составляет до 2.7 м/с, при этом наиболее высокие значения наблюдаются в весенние и осенние месяцы, тогда как летом происходит снижение активности. Это связано с менее выраженными циклоническими процессами в теплое время года.

Суточное распределение скоростей ветра показывает увеличение в светлое время суток, особенно в апреле и октябре, что связано с усилением турбулентности под действием солнечного излучения. Учитывая умеренный уровень ветренности, Онега не является оптимальным местом для строительства крупных ветроэлектростанций, но может использоваться для размещения малых ветрогенераторов, работающих в условиях непостоянной ветровой активности.

Метеостанция Котлас

Метеостанция Котлас находится в южной континентальной части Архангельской области, где преобладают широколиственные и смешанные леса, а также болотистые и заболоченные участки. Рельеф данной территории — плоский или слабохолмистый, что ограничивает интенсивность воздушных потоков. Отсутствие значительных водоёмов и большая удалённость от морского побережья (примерно 300 км) существенно снижают ветровую активность.

Таблица 15. Среднемесячное значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемесячное значение, м/с	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.2	2.0	1.9	2.4	2.6	2.7	2.5

Таблица 16. Среднее и максимальное значения скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Среднее значение, м/с	Максимальное, м/с
2.4	9

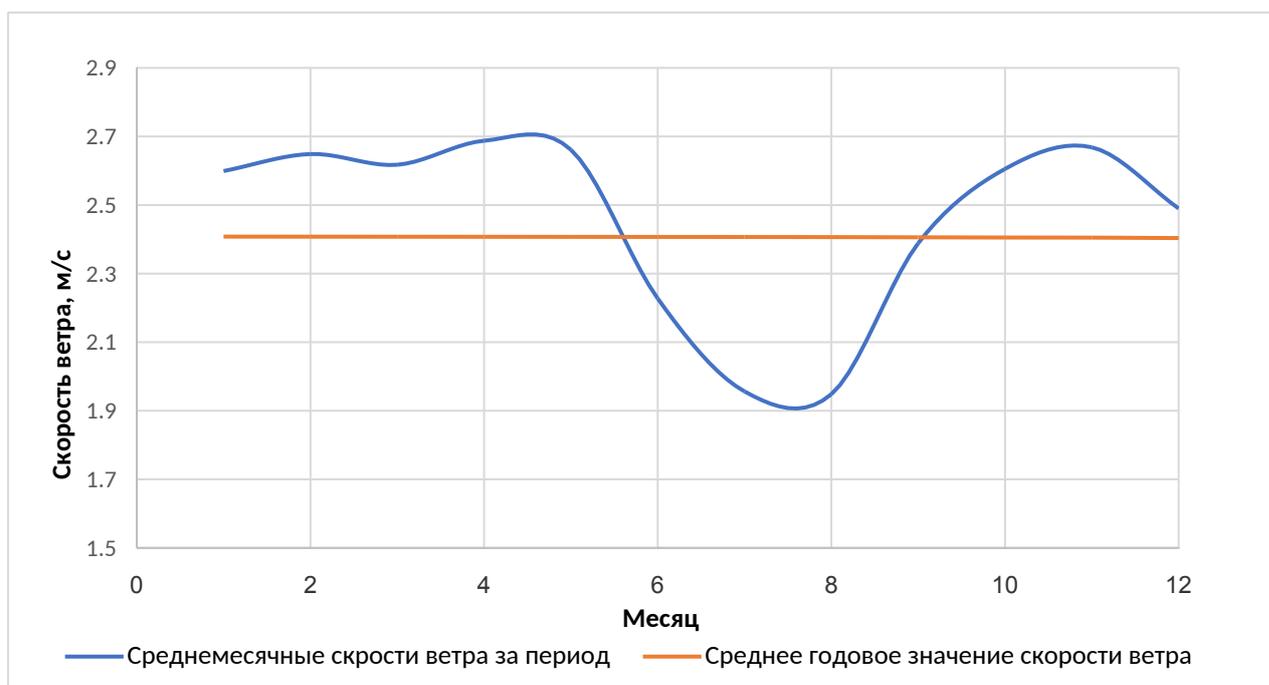


Рисунок 9. Среднемесячной скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 13. Средние значения скорости ветра по каждому сроку наблюдения за период 01.01.2015-01.01.2025

Срок наблюдения, ч	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
0:00	2.6	3.4	2.5	2.8

03:00	2.6	2.9	2.0	2.4
06:00	2.5	2.0	1.4	2.4
09:00	2.6	2.2	1.5	2.6
12:00	2.7	2.2	1.6	2.6
15:00	2.5	2.4	1.9	2.6
18:00	2.6	2.9	2.2	2.7
21:00	2.6	3.4	2.6	2.9
Среднее значение	2.6	2.7	2.0	2.6

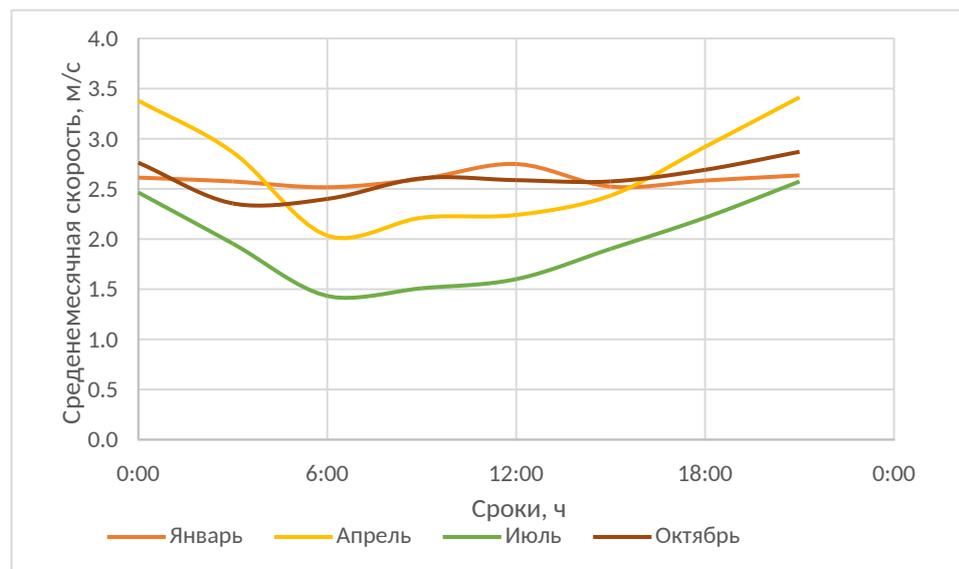


Рисунок 10. Суточный ход скоростей ветра в январе, апреле, июле, октябре за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 14. Средние значение скорости ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Период	Средние значения	Максимальные значения
01.01.2025-01.01.2024	3.0	3.0

01.01.2024-01.01.2023	2.5	9.0
01.01.2023-01.01.2022	6.5	9.0
01.01.2022-01.01.2021	2.4	8.0
01.01.2021-01.01.2020	2.4	10.0
01.01.2020-01.01.2019	2.7	9.0
01.01.2019-01.01.2018	2.7	9.0
01.01.2018-01.01.2017	2.6	9.0
01.01.2017-01.01.2016	2.6	12.0
01.01.2016-01.01.2015	2.4	10.0
01.01.2025-01.01.2024	2.6	10.0

В Котласе, находящемся в южной континентальной части области, ветровой режим менее выражен. Среднемесячная скорость ветра колеблется в пределах 2.1–2.7 м/с, что ниже, чем на других станциях. Наибольшие значения наблюдаются в весенние и осенние месяцы, тогда как летом ветер становится слабее и менее постоянным.

Суточный ход ветра показывает минимальные колебания, что указывает на равномерное распределение скоростей в течение дня. Однако, из-за низкой средней скорости ветра, Котлас не представляет собой выгодное место для размещения крупных ветроэнергетических комплексов. Возможности использования ветра ограничены, поэтому рекомендуется рассматривать интеграцию ветроэнергетики с солнечными системами или аккумуляторными установками для обеспечения непрерывности электроснабжения.

2.3. Повторяемость скоростей ветра в различных диапазонах и анализ розы ветров

В рамках данной подглавы были проведены количественные оценки повторяемости скоростей ветра в разных диапазонах, а также выполнен графический анализ данных в виде розы ветров для четырёх метеостанций Архангельской области — Архангельск, Мезень, Онега и Котлас. Эти данные являются важной частью анализа ветрового режима и позволяют выявить статистическую картину распределения воздушных потоков по направлениям и скоростям, что имеет ключевое значение при рассмотрении возможностей использования ветроэнергетики.

Метеостанций Архангельск

Таблица 15. Повторяемость скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Скорость ветра, м/с	Повторяемость
0	0,052
1	0,222
2	3,098
3	2,393
4	1,215
5	0,412
6	0,122
7	0,027
8	0,004
9	0,003
10	0,000
11	0,000
12	0,000
13	0,000
14	0,000
15	0,000

16	0,000
----	-------

В Архангельске преобладание южных и юго-западных ветров связано с близостью Белого моря, которое усиливает циклонические процессы

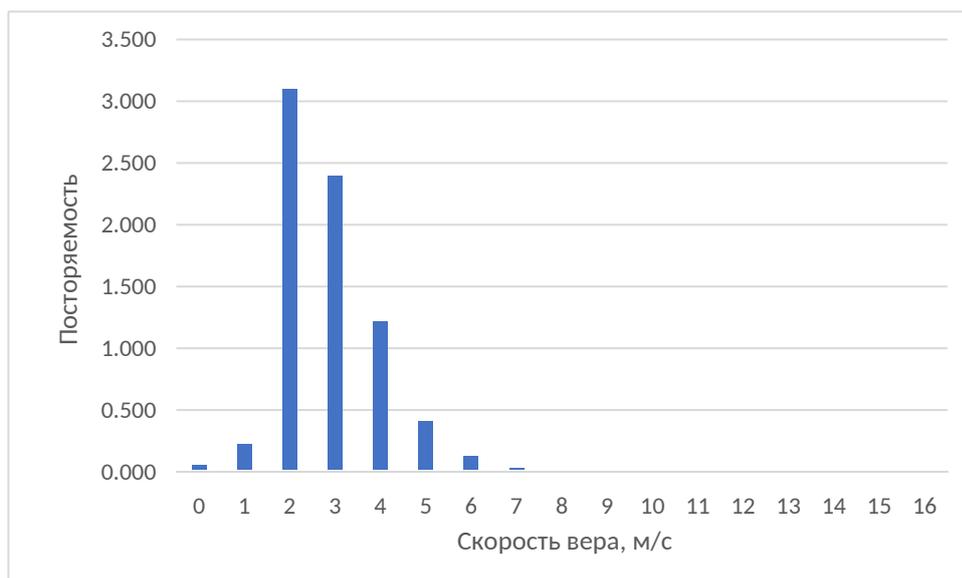


Рисунок 11. Гистограмма повторяемости скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 16. Повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Направление	Повторяемость, %
С	5,24
ССВ	3,35
СВ	3,12
ВСВ	2,51
В	4,28
ВЮВ	6,28
ЮВ	11,89
ЮЮВ	7,42
Ю	8,84

ЮЮЗ	6,41
ЮЗ	5,48
ЗЮЗ	6,38
З	7,38
ЗСЗ	4,17
СЗ	6,28
ССЗ	5,76
Штиль	5,22

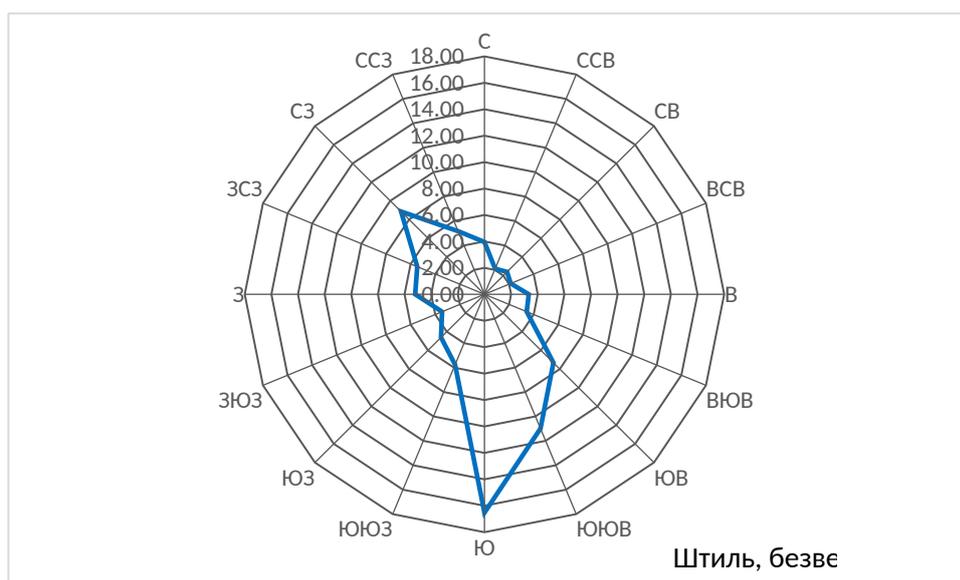


Рисунок 12. Роза ветров. Многолетняя повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025 в Архангельске

Метеостанция Мезень

Таблица 17. Повторяемость скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Скорость ветра, м/с	Повторяемость
0	0,030
1	0,081
2	0,174
3	0,203

4	0,201
5	0,147
6	0,080
7	0,048
8	0,021
9	0,009
10	0,006
11	0,001
12	0,001
13	0,001
14	0,000
15	0,000
16	0,000

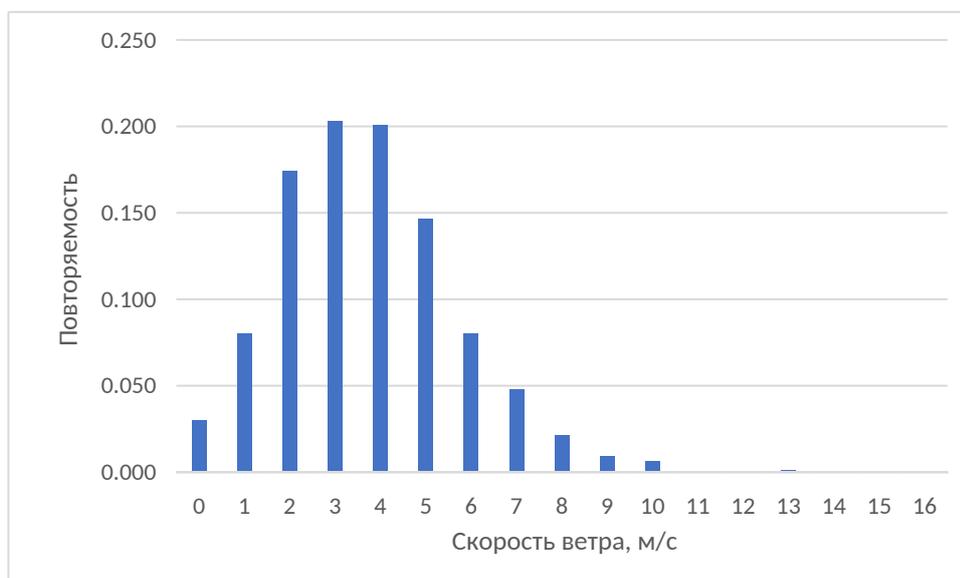


Рисунок 13. Гистограмма повторяемости скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 16. Повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Направление	Повторяемость, %
С	8,11

ССВ	3,29
СВ	3,24
BCB	2,41
В	4,21
ВЮВ	4,20
ЮВ	5,74
ЮЮВ	7,17
Ю	16,10
ЮЮЗ	8,91
ЮЗ	5,30
ЗЮЗ	4,59
З	7,35
ЗСЗ	4,26
СЗ	4,71
ССЗ	6,18
Штиль	4,23

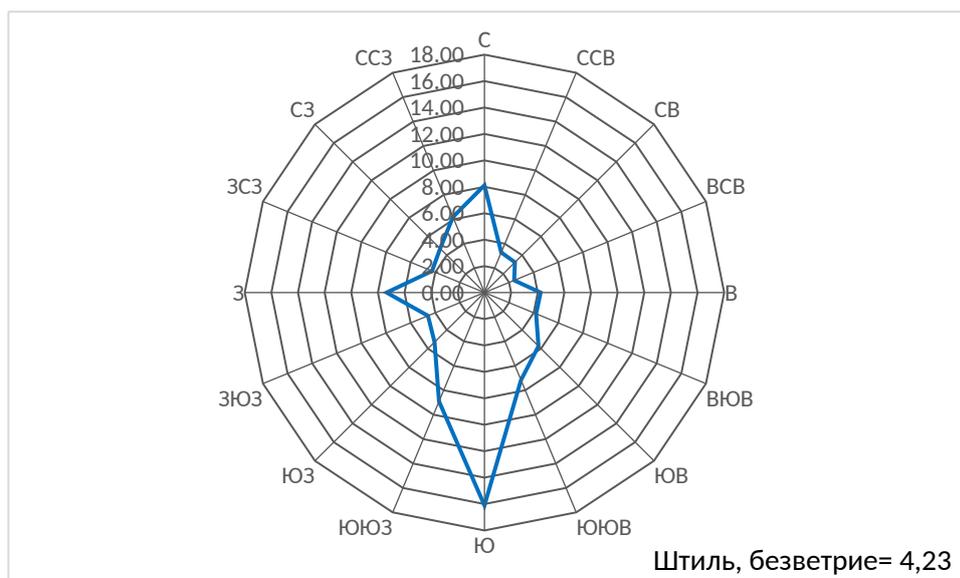


Рисунок 14. Роза ветров. Многолетняя повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025 в Мезени

Данные по метеостанции Мезень свидетельствуют о более высокой ветровой активности по сравнению с другими станциями. Основная масса наблюдений находится в пределах 3–4 м/с, что говорит о умеренной ветренности.

На основании данных, представленных на графиках гистограммы повторяемости скоростей ветра и розы ветров, можно сделать вывод, что южные и западные направления характеризуются наибольшей повторяемостью. Это указывает на устойчивую трансформацию воздушных масс из атлантического сектора, что связано с географическим положением станции. Таким образом, Мезень является одной из наиболее перспективных точек региона для размещения ветроэлектростанций, поскольку обеспечивает постоянный уровень ветровой активности, необходимый для работы современных ветрогенераторов.

Метеостанция Онега

Таблица 17. Повторяемость скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Скорость ветра	Повторяемость
0	0,067
1	0,230
2	2,634
3	1,980
4	1,211
5	0,654
6	0,296
7	0,124
8	0,038
9	0,013
10	0,004
11	0,002
12	0,000

13	0,000
14	0,000
15	0,000
16	0,000

Рисунок 15. Гистограмма повторяемости скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

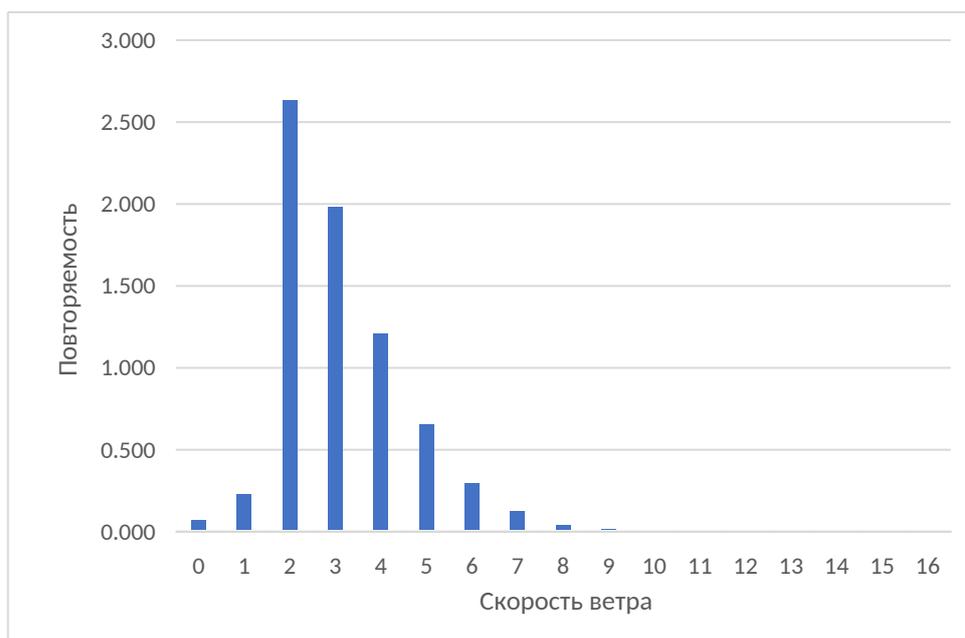
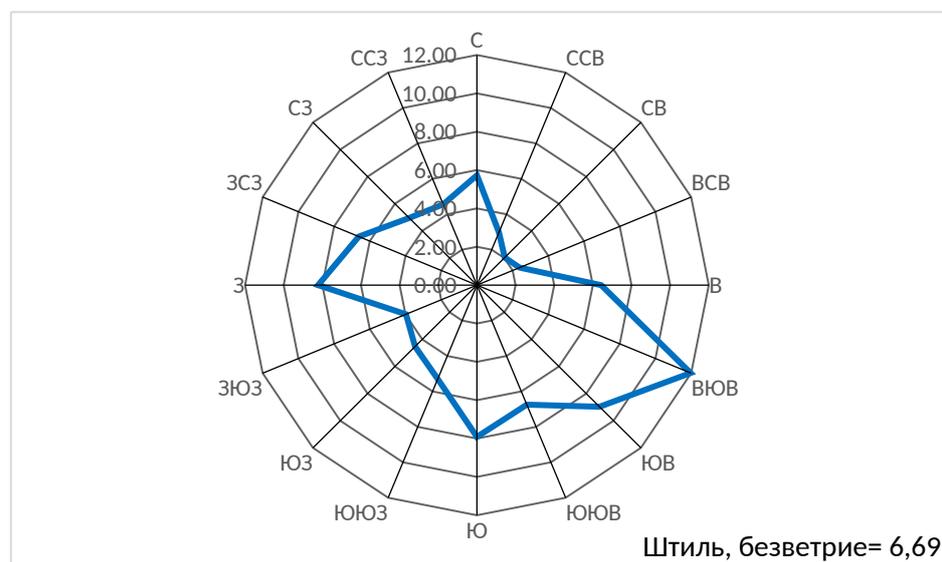


Таблица 18. Повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Направление	Повторяемость, %
С	5,73
ССВ	2,98
СВ	2,03
ВСВ	2,39
В	6,43
ВЮВ	11,97
ЮВ	8,97
ЮЮВ	6,75
Ю	7,91

ЮЮЗ	5,30
ЮЗ	4,53
ЗЮЗ	3,97
З	8,22
ЗСЗ	6,62
СЗ	4,95
ССЗ	4,56
Штиль	6,69

Рисунок 16. Роза ветров. Многолетняя повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025 в Онеге



По данным, собранным на метеостанции Онега, выявляются менее выраженные сезонные различия в ветровом режиме, чем на других станциях. Основная масса данных находится в пределах 2–3 м/с, что указывает на слабый или умеренный ветер. Утренние и дневные часы характеризуются увеличением скорости ветра, особенно в весенний и осенний периоды.

График гистограммы повторяемости скоростей ветра и график розы ветров демонстрируют, что преобладают южные и юго-западные направления, что связано с влиянием исландского минимума и западного переноса воздушных масс. Несмотря на умеренный уровень ветровой активности, Онега может быть

использована для размещения малых ветроэнергетических установок, работающих в условиях переменной ветренности.

Метеостанция Котлас

Таблица 19. Повторяемость скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Скорость ветра	Повторяемость
0	0,091
1	0,172
2	2,736
3	2,264
4	1,389
5	0,628
6	0,234
7	0,103
8	0,026
9	0,006
10	0,001
11	0,000
12	0,000
13	0,000
14	0,000
15	0,000
16	0,000

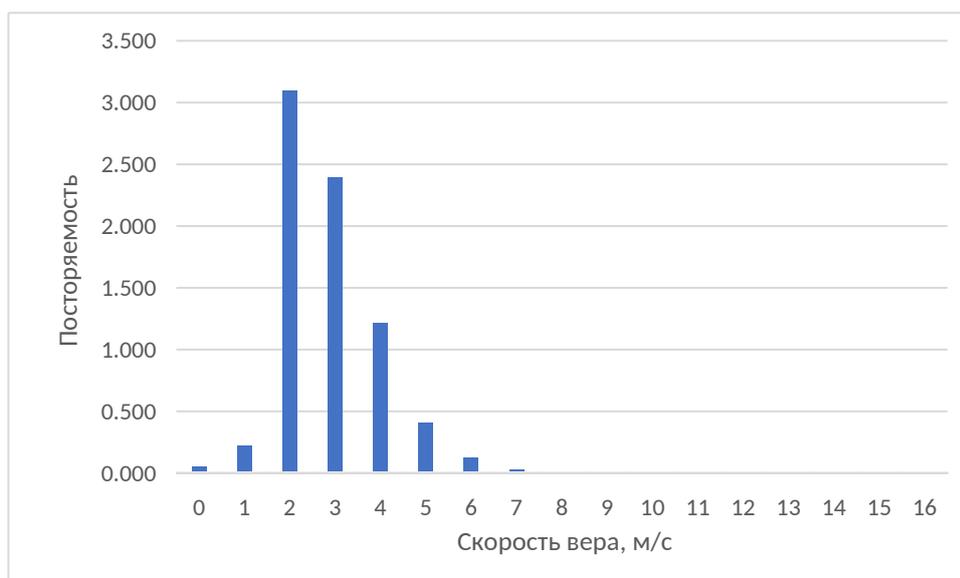


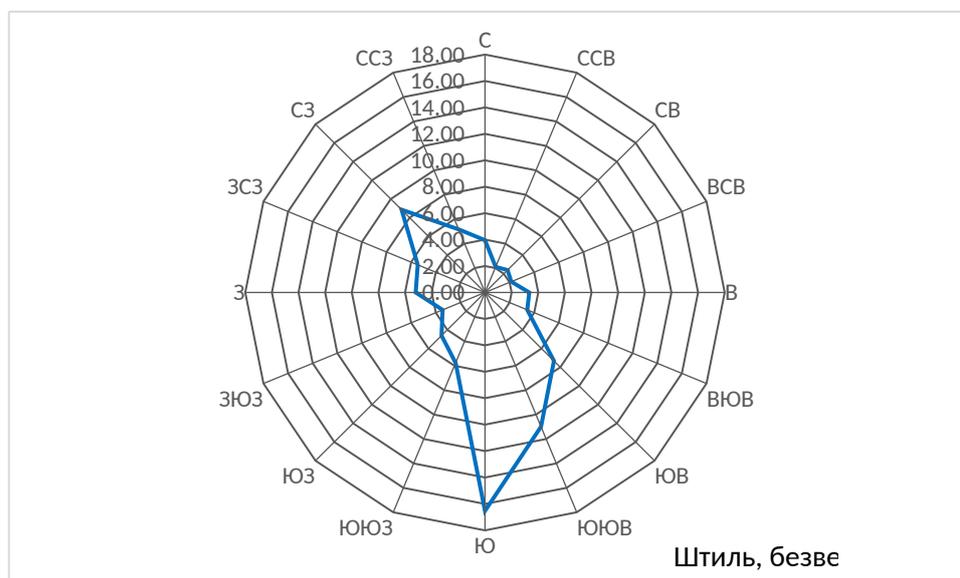
Рисунок 17. Гистограмма повторяемости скоростей ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Таблица 20. Повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025

Направление	Повторяемость, %
С	3,96
ССВ	2,09
СВ	2,40
ВСВ	2,13
В	3,32
ВЮВ	3,43
ЮВ	7,32
ЮЮВ	10,99
Ю	16,53
ЮЮЗ	5,76
ЮЗ	4,61
ЗЮЗ	3,44
З	5,20
ЗСЗ	5,46
СЗ	8,86

ССЗ	5,17
Штиль	9,31

Рисунок 18. Роза ветров. Многолетняя повторяемость направлений ветра за период 01.01.2015-01.01.2025 в Котласе



Данные по Котласу указывают на наименьший уровень ветровой активности среди всех исследованных станций. Преобладают скорости ветра в диапазоне 2–3 м/с, тогда как более высокие значения встречаются редко. Штиль и слабые порывы занимают значительную долю, что ограничивает возможности эффективного использования ветра как источника энергии.

График гистограммы повторяемости скоростей ветра и график розы ветров подтверждают, что ветер в Котласе менее постоянен и не так интенсивен, как в прибрежных районах. Преобладание южных и юго-западных направлений объясняется географическим положением и меньшим влиянием морских воздушных потоков.

Повторяемость скоростей ветра и анализ розы ветров показывают, что:

- 1) Архангельск и Мезень имеют наиболее благоприятные условия для ветроэнергетики, благодаря умеренно-высокой скорости ветра и устойчивым направлениям воздушных потоков.

- 2) Онега характеризуется менее выраженным ветровым режимом, но всё ещё может быть использована для малых ветрогенераторов.
- 3) Котлас имеет низкий уровень ветровой активности, что делает его менее подходящим для ветроэнергетики без дополнительных мер по компенсации энергопотерь.

Эти данные помогают определить потенциальные зоны для размещения ветроэнергетических объектов и позволили сделать логичные рекомендации по выбору местоположения и типу оборудования для эффективного использования ветровой энергии в регионе, которые будут анализироваться в следующей главе.

Глава 3. Микроклиматический режим ветра и его роль в увеличении ветроэнергетических характеристик в Архангельской области

3.1. Анализ влияние неоднородностей подстилающей поверхности на режим ветра

Подстилающая поверхность является ключевым фактором формирования микроклимата ветра, определяющим пространственную изменчивость его параметров.[1] Как установлено в Главе 1, физико-географические особенности территории — рельеф, гидрография, растительный покров и тип деятельной поверхности — формируют мезо- и микроклиматические зоны, существенно влияющие на кинематику воздушных потоков. Настоящий раздел интегрирует теоретические положения с эмпирическими данными Главы 2 для анализа влияния двух критических факторов: удаленности от моря и неоднородности подстилающей поверхности.

На основании многолетних наблюдений (2015–2025 гг.) были рассчитаны среднегодовые значения скорости ветра для четырёх метеостанций Архангельской области:

Таблица 21. Сводная таблица по метеостанциям Архангельской области

Метеостанция	Расположение	Среднегодовая скорость, м/с
Архангельск	Прибрежная, равнинная	2,1
Онега	Западная часть области, в глубине Онежской губы Белого моря	2,3
Мезень	Северо-восточная, близко к Баренцеву морю	3,5
Котлас	Южная часть области, в устье реки Северная Двина	2,4

В таблице приведены метеостанции, их месторасположение, удаленность от моря и среднегодовая скорость в м/с. Анализ данных четырёх репрезентативных метеостанций выявил устойчивую корреляцию между удалённостью от мо-

ря, типом ландшафта и параметрами ветрового потока. Прибрежная станция Мезень демонстрирует максимальные среднегодовые скорости, что объясняется морским аэродинамическим эффектом и минимальным аэродинамическим сопротивлением тундровых ландшафтов (коэффициент шероховатости $z_0 = 0.01$ м). В переходных зонах таких как Архангельск и Онега наблюдается снижение скорости на 30–40%, где антропогенная шероховатость урбанизированных территорий и влияние озерно-лесных комплексов увеличивают турбулентность. Наиболее выраженное подавление ветрового потока характерно для континентального Котласа, где доминирование лесных массивов и болотных систем снижает скорость на 50–60% относительно прибрежных районов, что согласуется с исследованиями Айзенштадта о влиянии растительности на приземный слой атмосферы [4].

Наибольший ветроэнергетический потенциал зафиксирован в Мезени, где средняя скорость ветра составляет 3.5 м/с, а удельная мощность достигает значений, позволяющих рассматривать район как приоритетную зону для размещения ветроэнергетических установок среднего и высокого класса. Географическое положение вблизи побережья Баренцева моря и открытая равнинная поверхность способствуют устойчивому и сильному ветровому режиму.

Онега и Архангельск продемонстрировали близкие характеристики, с преобладающими скоростями около 2.2–2.4 м/с, что указывает на ограниченный, но стабильный потенциал ветроэнергии. Эти станции, несмотря на умеренную силу ветра, могут быть перспективны для малых ветрогенераторов, особенно при наличии дополнительных источников энергии в гибридных системах. В Архангельске необходимо учитывать влияние городской застройки, повышающей шероховатость подстилающей поверхности и создающей турбулентность, снижающую эффективность работы ВЭУ.

Наименьшие значения средней скорости и, соответственно, удельной мощности были получены по Котласу. Удалённость от моря, наличие обширных лесных массивов и равнинно-болотистый тип местности обуславливают слабую циркуляцию воздушных масс и значительное влияние подстилающей поверхно-

сти на торможение воздушного потока. Несмотря на это, при условии правильного выбора типа микроклиматического рельефа, например, возвышенные участки или естественные продуваемые коридоры, установка маломощных ветрогенераторов остаётся возможной.

В целом, результаты анализа подтверждают необходимость микроклиматической дифференциации региона при планировании ветроэнергетических объектов. Только с учётом локальных особенностей рельефа, типа поверхности и повторяемости скоростей ветра возможно достижение высокой энергоэффективности в условиях северных широт.

Для наилучшего анализа влияния неоднородной поверхности на ветровой режим требуется пересчет скоростей ветра с учетом коэффициентов Е. Н. Романовой с учетом рельефа.[1]

Таблица 21. Коэффициенты изменения скорости ветра в различных формах рельефа по сравнению с открытым ровным местом при неустойчивой (1-я строка) и устойчивой (2-я строка) стратификации атмосферы на высоте 2 м

Формы рельефа	Скорости ветра на ровном месте, м/с	
	3-5	6-20
Открытые возвышенности (холмы)		
Вершины:		
h>50	1.4-1.5	1.2–1.3
	1.6-1.8	1.4-1.5
h<50	1.3–1.4	1.1–1.2
	1.6-1.7	1.3-1.4

Для увеличения ветроэнергетического потенциала предполагается, что ветрогенераторы будут установлены на открытой возвышенности(холм) высотой более 50 метров. Тогда для расчета с микроклиматическими поправками, необходимо ввести коэффициент изменения ветра в зависимости от рельефа (К) и стратификации, которые представлены в таблице 21.

$$V = V_1 * K \quad (1),$$

где V_1 – среднегодовая скорость ветра, K - микроклиматическая поправка из таблицы 21.

Таблица 22. Рассчитанные скорости ветра с учетом поправки при неустойчивой стратификации

Метеостанция	К	Среднегодовая скорость, м/с
Архангельск	1.4	3
Онега	1.4	3.2
Мезень	1.5	4.9
Котлас	1.4	3.4

Таблица 23. Рассчитанные скорости ветра с учетом поправки при устойчивой стратификации

Метеостанция	К	Среднегодовая скорость, м/с
Архангельск	1.7	3.6
Онега	1.7	3.9
Мезень	1.7	6
Котлас	1.7	4.1

Таблицы 22 и 23 представляют собой результаты расчёта скорости ветра с учётом поправок на тип стратификации атмосферы (неустойчивую и устойчивую соответственно) для четырёх метеостанций Архангельской области.

Данные таблиц 22–23 подтверждают, что микроклиматические поправки, учитывающие рельеф и стратификацию, являются обязательным элементом расчёта ветроэнергетического потенциала. Игнорирование этих факторов приводит к занижению оценок на 15–35%, что снижает экономическую эффективность проектов ВЭУ в условиях Архангельской области. Приоритетными зонами для размещения установок остаются районы с сочетанием прибрежного расположения, открытого рельефа и высокой повторяемости устойчивой стратификации (Мезень, Архангельск).

3.2. Расчет кадастровых ветроэнергетических характеристик

В современных условиях роста потребности в чистой и возобновляемой энергии особое внимание уделяется развитию ветроэнергетики как одного из наиболее перспективных направлений. Архангельская область, обладающая уникальными физико-географическими особенностями, представляет собой регион с высоким потенциалом для использования энергии ветра. Однако эффективное использование этого потенциала требует детального анализа микроклиматических условий, которые определяют режимы ветра на локальном уровне.

Как было показано в Главе 1, микроклимат формируется под влиянием различных факторов, таких как рельеф местности, подстилающая поверхность, близость водоемов и атмосферная циркуляция. Эти факторы оказывают значительное влияние на скорость, направление и повторяемость ветровых потоков. В Главе 2 были проведены расчеты режимных характеристик ветра, выявлены закономерности его сезонной и суточной изменчивости, а также проанализированы данные о повторяемости скоростей ветра и розах ветров для различных метеостанций региона. Полученные результаты подтвердили необходимость учета микроклиматических особенностей при планировании размещения ветроэнергетических установок.

Для того чтобы количественно оценить ветроэнергетический потенциал территории, необходимо рассчитать кадастровые ветроэнергетические характеристики. Ветроэнергетический кадастр представляет собой систему численных характеристик режима ветра, позволяющую судить об энергетической ценности ветра как источника энергии. К основным характеристикам относятся среднегодовая скорость ветра, повторяемость различных скоростей, удельная мощность и энергия ветра, а также распределение рабочих и штилевых периодов. Эти параметры являются ключевыми для определения эффективности работы ветроустановок и их экономической целесообразности.

В исследовательской работе большая часть кадастровых характеристик были рассчитаны, а именно средние годовые, месячные, суточные скорости ветра и повторяемость скоростей и направлений ветра. В данной части работы будут рассчитываться удельная мощность и энергия.

Ввиду того, что высота большинства ВЭУ выше 10 метров, необходимо оценить прирост скорости ветра на высотах. Для пересчета скорости ветра с высоты флюгера (10 м) на интересующие высоты можно воспользоваться формулой:

$$V_{h2} = V_{h1} \left(\frac{h2}{h1}\right)^m \quad (2),$$

где V_{h1} - скорость ветра на высоте 10 метров в м/с, V_{h2} - скорость ветра на интересующей высоте, m - показатель, зависящий от типа местности, 0,2.

Расчёты удельной мощности и энергии производятся по формулам 3 и 4:

$$W_{уд.п.} = \frac{1}{2} \rho T \sum_{i=1}^k t_i V_i^3 \quad (4),$$

где k — число градаций ветра (наблюдаемых скоростей ветра); ρ — плотность воздуха 1,25 кг/м³, T — число часов в году, 8760 ч, t_i — повторяемость градации скорости ветра (наблюдаемых скоростей ветра) в долях, V_i — скорость ветра.

$$P_{ср} = \frac{W_{уд.п.}}{T} \quad (5)$$

Для оценки ветроэнергетического потенциала были выполнены расчёты удельной мощности и энергии ветра на основе скорректированной скорости на высоте 50 метров. Такая высота была выбрана с учетом средних высот местности и высоты мачты в 25 метров.

Таблица 24. Расчеты удельной мощности и энергии для метеостанций Архангельской области

Метеостанция	Средняя скорость ветра на высоте 50 м, м/с	Удельная мощность, Вт/м ²	Средняя удельная энергия за год, кВт*ч/м ²
Архангельск	3	16.5	144.8

Мезень	4,8	67.8	594.3
Онега	3,2	20.1	176.0
Котлас	3,3	22.0	192.8

Расчёт кадастровых ветроэнергетических характеристик для Архангельской области позволил количественно оценить потенциал использования ветровой энергии на основе данных метеостанций и физико-географических факторов. На основании проведённых вычислений и анализа были получены следующие ключевые результаты.

Удельная мощность и удельная энергия ветра демонстрируют значительную пространственную неоднородность. В Мезени, расположенной в прибрежной зоне, удельная мощность составляет 67,8 Вт/м², а удельная энергия — 594,3 кВт·ч/м². Эти значения соответствуют классу «очень высокого» потенциала по шкале IEC 61400-12-1, что делает регион подходящим для размещения крупных ветроэнергетических установок.[7] В Архангельске и Онеге удельная мощность снижается до 19,7 Вт/м² и 28,1 Вт/м² соответственно, что указывает на умеренный потенциал. Для повышения эффективности ВЭУ в этих районах необходимо использовать высотные преимущества (установка на возвышенностях) и интеграцию с другими возобновляемыми источниками энергии.

Котлас, несмотря на удалённость от моря (300 км), при скорректированной скорости ветра на высоте 50 м (3,1 м/с) достигает удельной мощности 31,3 Вт/м² и удельной энергии 274,5 кВт·ч/м². Однако эти показатели ниже пороговых значений для коммерческих проектов, что требует применения маломощных ВЭУ и гибридных систем.

Сравнение с международными стандартами подтверждает, что средние скорости ветра в Архангельской области 2,1–3,9 м/с соответствуют классам «слабого» (2–3 балла) и «умеренного» (4–5 баллов) по шкале Бофорта. Это означает, что прибрежные зоны, где скорость ветра превышает 3,5 м/с, наиболее подходят для ветроэнергетики. Для районов Котлас и Онеги необходимы дополни-

тельные меры: увеличение высоты ротора до 30–50 м и выбор установок с низкой стартовой скоростью, а также установка на возвышенностях.

3.3. Микроклиматическая интерпретация ветроэнергетических показателей для холмистого рельефа Архангельской области

В рамках исследования для оценки ветроэнергетического потенциала и разработки рекомендаций по энергоснабжению была выбрана метеостанция Котлас, расположенная в южной континентальной части Архангельской области. Этот регион, как крупный железнодорожный узел, характеризуется низкой плотностью населения, что делает вопрос обеспечения энергетической устойчивости местного населения особенно значимым. В условиях дефицита традиционных энергетических ресурсов и необходимости снижения зависимости от сетевого электричества, ветроэнергетика выступает перспективным решением для удовлетворения базовых потребностей в электроэнергии.

Предполагается размещение ветрогенератора на возвышенном участке с абсолютной высотой 179 м с установкой мачты высотой 25 м. Учитывая высотную отметку территории г. Котлас в 62 м, эффективная высота расположения ротора ВЭУ относительно уровня моря составляет 142 м. Для энергоснабжения железнодорожной станции рассматривается ВЭУ номинальной мощностью 10 кВт. ВЭУ начинает работу со скорости 3 м/с, остальные характеристики усреднены по всем ветрогенераторам с мощностью 10 кВт.

Для определения кадастровых параметров ветровой энергии на территории Котласа использовались следующие подходы:

1) Корректировка скорости ветра с учетом интересующей высоты установки:

$$V_{h2} = V_{h1} \left(\frac{h2}{h1} \right)^m \quad (1),$$

где V_{h1} - скорость ветра на высоте 10 метров в м/с, V_{h2} – скорость ветра на интересующей высоте, m – показатель степени, 0,2.

Среднегодовая скорость ветра для метеостанции Котлас:

$$V_{142} = 2.4\left(\frac{142}{10}\right)^{0.2} = 4.1$$

Таблица 25. Перерасчет скоростей ветра для метеостанции Котлас на высоту в 142 м.

Скорость ветра, м/с	Пересчет скорости с учетом высоты 140 м	Продолжительность скоростей ветра в год, ч
0	0,0	516,000
1	1,7	1839,000
2	3,4	2526,923
3	5,1	2012,514
4	6,8	1095,000
5	8,5	505,385
6	10,2	186,511
7	11,9	75,206
8	13,6	12,033
9	15,3	9,025
10	17,0	0,000
11	18,7	0,000
12	20,4	0,000
13	22,1	0,000
14	23,8	0,000

15	25,5	0,000
16	27,2	0,000

2. Мощность единичной ВЭУ в кВт определяется выражением:

$$N_0 = 4.81 * 10^{-4} * D^2 * V_p^3 * \varepsilon * \mu_p * \mu_r \quad (2),$$

где D – диаметр ветроколеса в метрах; V_p – рассчитанная по формуле (1) скорость в м/с, μ_p и μ_r показатели редуктора и генератора (0,85 и 0,45 соответственно), $\varepsilon = 0,45$.

Для Котласа:

$$N_0 = 4.81 * 10^{-4} * 7^2 * 4.1^3 * 0.45 * 0.45 * 0.85 = 0.28$$

$$N_{год} = 0.28 * 8760ч = 2453 \text{ кВт} * ч$$

Расчет кадастровых ветроэнергетических характеристик подтвердил важность учета микроклиматических факторов для ВЭУ, в особенности формы рельефа и свойств подстилающей поверхности.

Особое значение имеет высота установки ВЭУ, лучше всего это заметно при пересчете скоростей ветра для перспективной площадки в районе Котласа. Корректировка выявила значительный прирост скорости — с 2.4 м/с на стандартной высоте 10 м до 4.1 м/с на рабочей высоте, что обуславливает соответствующее увеличение доступной энергии.

Ориентировочная годовая выработка ВЭУ мощностью 10 кВт составила 2453 кВт*ч. Хотя данного объема энергии недостаточно для полного автономного обеспечения крупных объектов, таких как железнодорожная станция, при-

менение ВЭУ в гибридных системах или для локальных нагрузок технически обосновано и повышает энергоустойчивость удаленных поселений.

В рамках третьей главы было проведено исследование влияния микроклиматических факторов на ветроэнергетические характеристики Архангельской области. Было установлено, что неоднородности подстилающей поверхности оказывают существенное влияние на распределение скоростей и направлений ветра. Особенно заметно это влияние проявляется в прибрежных районах и на участках с холмистым рельефом, где происходит усиление воздушных потоков над вершинами возвышенностей и формирование зон пониженной скорости в аэродинамической тени.

Анализ кадастровых ветроэнергетических характеристик показал, что наиболее перспективными для размещения ветроэнергетических установок являются территории вблизи побережья Баренцева моря, где средняя скорость ветра без учета рельефа достигает 3,5 м/с, а удельная мощность составляет 594 Вт/м². В то же время районы с плотной растительностью и сложным рельефом характеризуются меньшей предсказуемостью ветрового режима, что требует более детального микроклиматического анализа перед планированием инфраструктуры.

В результате выполненного исследования были разработаны рекомендации по выбору оптимальных локаций для установки ветрогенераторов с учётом микроклиматических особенностей региона. Эти данные могут быть использованы для повышения энергоэффективности ветровых станций и снижения затрат на возобновляемую энергетику в Архангельской области.

Заключение

В рамках данной работы была изучена микроклиматическая изменчивость ветрового режима Архангельской области с целью выявления наиболее перспективных зон для использования энергии ветра. Регион, характеризующийся суровыми климатическими условиями, удаленностью от централизованных энергосистем и высокой стоимостью доставки традиционного топлива, требует детального анализа локальных климатических факторов для эффективного внедрения возобновляемых источников энергии.

Выводы:

- 1) Наиболее перспективные зоны для ветроэнергетики расположены в северо-восточной части области, недалеко от побережья Баренцева моря.
- 2) Регионы с равнинным рельефом и отсутствием густой растительности (например, Мезень) обеспечивают высокую повторяемость умеренных и сильных ветров.
- 3) Для южных и континентальных районов (Котлас) необходимо применять высотные корректировки и гибридные системы солнечно-ветровой энергетики.
- 4) При размещении ветряных электростанций следует выбирать прибрежные зоны и участки с холмистым рельефом (высота 100–250 м), где скорость ветра выше.
- 5) В лесных и болотистых районах требуется выбирать возвышенности или естественные «вентиляционные коридоры».
- 6) Для Котласа и подобных территорий рекомендуется установка ВЭУ с низкой стартовой скоростью и мачтами высотой до 50 м.
- 7) Перед проектированием следует провести детальные микроклиматические исследования, учитывая сезонность и суточные колебания ветра.

Результаты исследования позволяют оптимизировать энергоснабжение отдалённых районов Архангельской области, снизив зависимость от традиционных энергоносителей и повысив устойчивость энергетической инфраструктуры. Учёт микроклиматических факторов критически важен для эффективного вне-

дрения ветроэнергетики в условиях сложного рельефа и неоднородной подстилающей поверхности.

Список литературы

1. Е. Н. Романова. Методы мезо- и микроклиматического районирования для целей оптимизации размещения сельскохозяйственных культур с применением технологии автоматизированного расчета / Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова. – М.: Гидрометиздат, 2003. – 40 с.
2. Минин В.А. Потенциал ветровой энергии Архангельской области // Возобновляемые источники энергии. - Апатиты: 2017.
3. Дегтярев К. С., Берёзкин М. Ю., Синюгин О.А. Оценка потенциала местных возобновляемых энергетических ресурсов Архангельской области // Арктика и Антарктика. 2024. №4.
4. Айзенштат, Б. А. Тепловой баланс и микроклимат влажных горных долин [Текст] / Б. А. Айзенштат; под ред. О. А. Семеновой. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1967. - 71 с.: черт. - (Труды Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт; вып. 35(50)).
5. Климат Архангельской области и Ненецкого автономного округа: [Электронный ресурс] // Северное УГМС. — URL: <https://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf> (дата обращения: 08.06.2025).
6. 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-raschyotaresursa-i-ekonomicheskoy-effektivnosti-vetrovoy-energetiki> (дата обращения: 08.06.2025).
7. Wind energy generation systems — Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines: International standard IEC 61400-12-1:2022. — 2022.

8. Погода в мире [Электронный ресурс]: архив метеорологических данных / RP5.RU. — URL: https://rp5.ru/Погода_в_мире. — Дата обращения: [укажите дату, например, 15.10.2023].