

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.
Ломоносова»**

Высшая школа естественных наук и технологий
Прасолов Сергей Дмитриевич

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

05.03.04 Гидрометеорология
Полярная метеорология
Возможность использования ветроэнергетики в отдаленных
поселениях Архангельской области
Утверждена приказом от «29» ноября 2018 г. № 2877

Руководитель ВКР	_____	_____	Л.Н. Поликина, доцент, к.г.н., доцент
Нормоконтроль	_____	_____	Л.Н. Поликина, доцент, к.г.н., доцент
Руководитель ОПОП	_____	_____	Н.А. Кондратов, доцент, к.г.н., доцент
	(дата)	(подпись)	

Постановление ГЭК от «18» июня 2019 г.

Признать, что обучающийся С.Д. Прасолов
выполнил и защитил ВКР с
отметкой

_____ (отметка прописью)

Председатель ГЭК	_____	М.В. Сурсо
	(подпись)	
Секретарь ГЭК	_____	Я.К. Преминаина
	(подпись)	

АННОТАЦИЯ

Прасолов С.Д. Возможность использования ветроэнергетики в отдаленных поселениях Архангельской области.

Руководитель ВКР – доцент, кандидат географических наук Л.Н. Поликина.

Выпускная Квалификационная работа объемом 46 с. содержит 18 рисунков, 8 таблиц, 32 литературных источника.

Ключевые слова: ветроэнергетика, Архангельская область, ветроэнергетический потенциал.

Цель работы: Оценка возможности использования энергии ветра для снабжения отдаленных сельских поселений электроэнергией.

Структура ВКР: состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников.

В первой главе выполнен обзор особенностей использования ветроэнергетических установок, определена методика проведения исследования.

Во второй главе выделены физико-географические особенности рассматриваемого района, особенности расселения и энергетической системы.

В третьей главе проведена оценка ветроэнергетического потенциала территории и возможности использования энергии ветра.

ОГЛАВЛЕНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОСОБЕННОСТИ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА.....	9
1.1 Место ветроэнергетических ресурсов в структуре климатических ресурсов.....	9
1.2 Особенности энергоснабжения, преимущества и недостатки использования ветроэнергетических установок в условиях Севера.	10
1.3 Направления развития ветроэнергетики в условиях Севера.....	12
1.4 Обзор нормативных документов по теме исследования.....	13
1.5 Методика проведения исследования.....	14
2 ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ.....	20
2.1 Физико-географическая характеристика района исследования	20
2.2 Краткая климатическая характеристика района исследования	22
2.3 Особенности расселения и структуры экономики региона.....	24
2.4 Состояние энергетики Архангельской области.....	25
3 КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ.....	28
3.1 Ветровой режим района исследования.....	28
3.2 Валовый потенциал района исследования.....	32
3.3 Технический потенциал района исследования.....	34
3.4 Повторяемость опасных для развития ветровой энергетики явлений погоды.....	37

3.5 Целесообразность развития ветровой энергетики в районе исследования.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	42
Сведения о самостоятельности выполнения работы.....	46

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем текстовом документе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

Федеральный закон от 26.03.2003 года № 35-ФЗ Об электроэнергетике;

Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2016 г. №1634-р Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики;

Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 N 1-р Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года;

Постановление Правительства Российской Федерации от 28.05.2013 года № 449 О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности;

ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры (с Изменением N 1);

ГОСТ Р 51237-98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения;

ГОСТ Р 51990-2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация;

ГОСТ Р 54531-2011 Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. Термины и определения;

РД 52.04.275-89 Методические указания для проведения изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем текстовом документе применяются следующие определения, обозначения и сокращения:

Ветроагрегат – система, состоящая из ветродвигателя, системы передачи мощности и приводимой ими в движение машины.

Ветроэлектрическая станция – электростанция, состоящая из двух и более ветроэлектрических установок, предназначенная для преобразования энергии ветра в электрическую энергию и передачу ее потребителю.

Ветроэнергетическая установка – комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии.

ВИЭ – возобновляемые источники энергии.

ВЭС – ветроэлектрическая станция.

ВЭУ – ветроэнергетическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена оценке возможности использования ветроэнергетических ресурсов в отдаленных сельских поселениях на Беломорском побережье Архангельской области и Ненецкого автономного округа. Актуальность работы заключается в том, что Арктические районы Российской Федерации имеют значительный потенциал использования ветроэнергетических ресурсов. В то же время, из-за труднодоступного географического положения, малой развитости инфраструктуры и суровости климата, населенные пункты севера России зачастую отрезаны от цивилизации, в том числе и от централизованных систем энергоснабжения. Генерация электроэнергии в этих населенных пунктах происходит с использованием дорогостоящего дизельного топлива, доставка которого может происходить только северным завозом в короткий теплый период года, что ведет к значительному удорожанию топлива. В таких условиях использование климатических ресурсов и, в частности, ресурсов ветра позволяет удешевить конечную электроэнергию и снизить антропогенную нагрузку на чувствительные арктические экосистемы.

Объект исследования: Отдаленные сельские поселения Архангельской области.

Предмет исследования: Ветроэнергетические ресурсы северной части Архангельской области

Цель работы: Оценка возможности использования энергии ветра для снабжения отдаленных сельских поселений электроэнергией.

Для осуществления указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить теоретические аспекты темы исследования;
2. Рассмотреть и подобрать методику оценки ветроэнергетических ресурсов;

3. Провести оценку ветроэнергетических ресурсов выбранного района;

4. Оценить повторяемость явлений погоды, представляющих опасность для функционирования ветроэнергетических установок;

5. Оценить возможность использования энергии ветра в отдаленных поселениях Архангельской области.

Методы исследования: статистический, аналитический, сравнительно-географический, картографический.

Научная новизна. В работе произведены расчеты валового и технического ветроэнергетического потенциала северной части Архангельской области. Оценена возможность использования ветроэнергетических ресурсов для выработки электроэнергии в удаленных сельских поселениях, определены основные преимущества и недостатки. Проведена оценка опасных явлений погоды в рассматриваемом районе, которые могут оказывать негативное влияние на безопасность функционирования ветроагрегата.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть использованы для преподавания курсов по направлению подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология», а также при планировании развития инфраструктуры отдаленных сельских поселений Архангельской области.

Защищаемые положения:

1. Приморская часть Архангельской области обладает высокими климатическими ветроэнергетическими ресурсами;

2. Ветроэнергетические ресурсы достаточны для обеспечения электроэнергией отдаленных населенных пунктов севера Архангельской области.

Апробация исследований. Материалы исследований, приведенных в данной работе, были изложены и обсуждены на нескольких научных конференциях международного и регионального уровней: Межрегиональная молодежная научно-исследовательская конференция «Геоэкологические проблемы Европейского Севера и

Арктики» (15 февраля 2019 года), Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований» в рамках XV Большого Географического Фестиваля (5-7 апреля 2019), научно-практическая конференция «Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых ВШЕНиТ, 2019» (18 Апреля 2019).

По теме исследований, проведенных в рамках дипломной работы, опубликовано работы в изданиях из перечня РИНЦ: «Географические факторы развития ветроэнергетики на севере Архангельской области» (Геоэкологические проблемы Европейского Севера и Арктики: материалы межрегиональной молодежной научно-исследовательской конференции (Архангельск, 15 февраля 2019 г.) (в печати)); «Ветроэнергетический потенциал прибрежных районов Архангельской области» (Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 180-летию российского путешественника и натуралиста, исследователя Центральной Азии Н.М. Пржевальского, проведенной в рамках XV Большого географического фестиваля (в печати)); «Неблагоприятные для развития ветроэнергетики явления погоды на севере Архангельской области» (Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых учёных - 2019: сборник материалов конференции (в печати)).

Структура работы: работа включает в себя введение, три главы и ряд подразделов, в которых решаются поставленные исследовательские задачи, заключение, список источников используемой литературы из 32 источников на 46 печатных листах.

1 ОСОБЕННОСТИ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

1.1 Место ветроэнергетических ресурсов в структуре климатических ресурсов

Климатические ресурсы – это неисчерпаемые природные ресурсы, используемые для прямого и непрямого потребления, создания материальных благ и улучшения качества жизни. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – это источники энергии, образующиеся на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе, а также жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества (ГОСТ Р 54531-2011). К возобновляемым источникам энергии относятся:

- гидравлическая энергия речного стока;
- гидравлическая энергия приливов, морских волн и течений;
- энергия воздушного потока;
- тепловая и лучистая солнечная энергия;
- тепловая энергия океана;
- геотермальная энергия;
- биологическая энергия.

Для данного типа ресурсов характерна территориальная и временная неравномерность в поступлении и распределении, прерывистость энергоотдачи и её существенная зависимость от природных факторов, трудности в концентрации энергии и создании крупных электростанций [15].

Для преобразования энергии воздушного потока в электроэнергию используются ветроэнергетические установки (ВЭУ). Согласно ГОСТ Р 51990-2002, в зависимости от мощности генерируемой энергии они подразделяются на: установки большой мощности (мегаваттного класса - свыше 1 МВт); средней мощности (от

100 кВт до 1 МВт); малой мощности (от 5 до 99 кВт); очень малой мощности (менее 5 кВт). Для характеристики количества энергии, которое можно произвести на территории с использованием энергии ветра, используется понятие ветроэнергетического потенциала.

Понятие ветроэнергетического потенциала включает в себя понятия валового, технического и экономического потенциалов. Определение данных понятий дается в ГОСТ Р 51237-98. Валовой потенциал – это энергетический эквивалент ветрового потока какой-либо местности на определенной высоте над поверхностью земли. Валовой потенциал отображает энергию потока с учетом всех скоростей ветра. Технический потенциал – это часть валового потенциала, которая может быть полезно использована с помощью современного ветроэнергетического оборудования с учетом требований социально-экологического характера. Экономический потенциал – это часть технического потенциала, использование которого экономически эффективно в современных условиях с учетом требований социально-экономического характера.

За 2017 год в мире с использованием возобновляемых ресурсов всех типов было произведено 2195 ГВт энергии, что составляет 26,5 % общего производства энергии. Ветроэнергетика занимает одну из ведущих ролей в мировом производстве энергии из возобновляемых источников (после гидроэнергетики). В 2017 году на ее долю приходилось 539 ГВт или 5,6 % произведенной в мире энергии. Мировое использование энергии ветра ежегодно возрастает, к примеру, в 2007 году ветроэлектрическими станциями в мире было произведено 94 ГВт энергии. Ведущей страной по использованию энергии ветра является Китай: в 2017 году на китайских объектах ветроэнергетики было произведено 188,4 ГВт энергии. Следом идет США (89 ГВт) и Германия (56,1 ГВт). Также в топ 10 входят Индия, Испания, Великобритания, Франция, Бразилия, Канада, Испания [29]. В России, несмотря на высокий потенциал, ветроэнергетика развита значительно слабее. В 2016 году установленная мощность Российских

ветроэлектрических станций составила 11 МВт. Мощность ветропарков в Крыму, построенных под административным управлением Украины, составила 87,8 МВт [20].

1.2 Особенности энергоснабжения, преимущества и недостатки использования ветроэнергетических установок в условиях Севера

Северные регионы России обладают большим потенциалом для развития и использования возобновляемой энергии. Практическое использование возможно лишь для небольшой части этих ресурсов. Основными сложностями являются суровые климатические условия и, как следствие, малая населенность территории: в арктической зоне РФ проживает менее 2 % населения страны. Для этих территорий характерно слабое развитие транспортной инфраструктуры, малое количество крупных промышленных потребителей энергии.

Основная часть населения северных районов России обеспечивается теплом и электричеством за счет местных, либо подключенных к единой энергосистеме страны электростанций. Большое количество небольших населенных пунктов, расположенных в труднодоступной местности, не подключены к единой системе энергоснабжения. Для обеспечения энергией этих населенных пунктов используются дизельные электростанции. Обеспечение потребителей электроэнергией зачастую нестабильно. Энергетическая инфраструктура данных районов характеризуется малой эффективностью, высокими потреблением первичных энергоресурсов на единицу валового регионального продукта и уровнем потерь при передаче электроэнергии до потребителя, а также значительной степенью изношенности генерирующего оборудования: средний износ составляет 60 % [23].

Особенностью данных районов является также «северный завоз». Из-за отдаленного расположения поселений и слабо развитой транспортной инфраструктуры, доставка в них топлива осуществляется в летний период с помощью авиации, речного и

морского транспорта, в том числе по Северному морскому пути, реже в зимний период по зимним дорогам. Как следствие происходит значительное удорожание топлива: доля транспортных расходов в его стоимости может достигать 70 % [23]. В конечном итоге это приводит к значительному удорожанию генерируемой электроэнергии и необходимости субсидирования со стороны государства.

Использование возобновляемых источников энергии и, в частности, энергии ветра, в условиях севера обладает рядом преимуществ. Наиболее важным является снижение, либо отсутствие топливной составляющей в стоимости электроэнергии. Помимо этого, важными являются также относительно низкий уровень начальных капиталовложений, по сравнению с традиционными источниками энергии и малое влияние на окружающую среду. К недостаткам можно отнести высокую стоимость обслуживания и зависимость от климатических условий региона [23]. Суровый климат также обуславливает особые требования к конструкции и материалам, используемым при постройке и обслуживании установок.

Помимо экономического фактора в использовании энергии ветра важен также и экологический. Отрицательное воздействие дизельных электростанций на окружающую среду не ограничивается атмосферными выбросами. Ежегодно в рамках «северного завоза» поставляется до 6-8 млн т горюче-смазочных материалов, что ведет к накоплению большого количества пустых бочек. Вывоз и утилизация отходов крайне дорогие, а также затруднены, или зачастую невозможны из-за труднодоступности поселений. При накоплении и разрушении большого количества бочкотары возможно попадание остатков топлива в окружающую среду, что особо опасно для хрупких арктических экосистем.

Ветроэнергетика в России находится на начальных этапах своего развития. Оно затрудняется по ряду причин: как правовых (многие действующие стандарты не учитывают особенности возобновляемой энергетики; сложности перевода земель в пригодные для

строительства на них ветроэнергетических установок), так и экономических (недостаток инвестиций и инвесторов) [20]. Существует как положительный, так и отрицательный опыт эксплуатации ветровой энергии, показавший необходимость адаптации проектов к арктическим условиям.

1.3 Направления развития ветроэнергетики в условиях Севера

Исходя из перечисленных выше особенностей можно выделить несколько направлений развития ветроэнергетики в условиях севера. Основным среди них является автономная генерация. Помимо большого количества малых населенных пунктов на севере есть такие объекты как маяки, метеостанции, нефтедобывающие платформы, военные базы и погранзаставы.

Маяки и метеостанции, потребляя небольшое количество топлива, нуждаются в непрерывном и надежном снабжении электроэнергией. В 1996-2010 годах, в рамках российско-норвежского проекта на маяках Мурманской, Архангельской областях и других регионов отработанные радиоизотопные термоэлектрические генераторы были заменены на альтернативные источники питания на основе солнечной и ветровой энергии [12]. Ветроэнергетика используется для обеспечения энергией газовых месторождений. В Ямало-Ненецком автономном округе функционирует более 200 ветросолнечных генераторов очень малой мощности на различных объектах газовой инфраструктуры [3]. Рассматриваются возможности применения ВЭУ для обеспечения энергией других существующих и проектируемых объектов газовой промышленности [14].

Существует опыт эксплуатации ветроэнергетических установок для обеспечения электроэнергией населенных пунктов российской Арктики. При этом ветрогенераторы обычно обеспечивают производство не всей необходимой энергии, а работают в составе комбинированных установок, включающих в себя также традиционные дизельные электростанции и, в некоторых случаях,

солнечные батареи. Используются как зарубежное, так и отечественное оборудование, мощность ветрогенераторов малая или средняя. Несколько таких комплексов функционирует в удаленных населенных пунктах Мурманской области. Отдельные установки также используются в Ненецком (поселок Амдерма) и Ямало-Ненецком (город Лабытнанги) автономных округах [3]. В Якутии функционирует ветровая электростанция в поселке Тикси. Также стоит отметить большой неудачный опыт эксплуатации подобных сооружений.

Большинство объектов ветроэнергетики в России обладают малой или средней мощностью. При этом крайне мал опыт эксплуатации установок мегаваттного класса. Существующие ветропарки такой мощности требуют капитального ремонта. Северные районы обладают наиболее высоким в России ветропотенциалом. В некоторых районах он достаточен для возведения крупных ветропарков большой мощности. Помимо суровых климатических условий основным препятствием для подобных проектов является отсутствие инфраструктуры, необходимой для подключения подобных объектов к централизованным энергосетям, а также высокая стоимость и сложность ее создания и эксплуатации. Важным фактором является малое количество промышленных потребителей и обеспеченность существующих предприятий всей необходимой инфраструктурой. В связи с этим автономное функционирование таких ветропарков, без подключения к единой энергосистеме, является малоцелесообразным.

1.4 Обзор нормативных документов по теме исследования

Во многих зарубежных странах законодательно закреплена государственная поддержка использования возобновляемых источников энергии. На 2017 год в 179 странах оказывалось государственное стимулирование в этой области [30]. В последние годы правительство РФ также делает шаги для ускорения развития возобновляемой энергетики. В поправках от 4.11.2007 г. в

Федеральный закон от 26.03.2003 года № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» определяется роль государства в осуществлении поддержки, а также меры по ускорению развития возобновляемых источников энергии. Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 N 1-р «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года» ставит цели по увеличению доли возобновляемых источников в энергетике. В постановлении Правительства Российской Федерации от 28.05.2013 года № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» определяются механизмы работы с объектами и нормы по развитию возобновляемой энергетики [20]. Распоряжение Правительства от 01.08.2016 г. №1634-р «Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики», устанавливает перечень ветровых электростанций мощностью 100 МВт и выше, планируемых для размещения до 2030 года. В частности, планируется установка ветровых электростанций на Кольском полуострове. Принят также ряд постановлений, распоряжений и прочих нормативно-правовых актов, дополняющих и расширяющих перечисленные документы.

1.5 Методика проведения исследования

Состав климатической информации, на основе которой производится оценка ветроэнергетического потенциала региона, изложен в РД 52.04.275-89. Климатическую информацию можно условно разделить на две части: общая климатическая информация и специализированные климатические характеристики.

К общей климатической информации относятся характеристики, используемые для оценки теоретического (валового) ветроэнергетического потенциала. На основе этих характеристик можно определить удельную мощность ветрового потока – показателя

теоретического потенциала энергии ветра, рассчитываемого с учетом всего диапазона фактически наблюдаемых скоростей ветра. К первой части относятся:

- средняя скорость ветра за год и по месяцам;
- амплитуда суточного хода скорости ветра по сезонам года;
- повторяемость скорости ветра по градациям.

Специализированными климатическими характеристиками, с помощью которых оцениваются реальные ветроэнергетические ресурсы, являются:

- суммарная повторяемость диапазона рабочих скоростей, при которых ВЭУ вырабатывает электроэнергию;
- диапазон скоростей, когда ВЭУ работает в режиме номинальной мощности;
- энергетические затишья, то есть скорости ветра ниже определенного уровня, когда ВЭУ не вырабатывает электроэнергию;
- диапазон «буревых» скоростей, когда ВЭУ отключается во избежание поломки лопастей.

Оценка климатических характеристик проводилась за период с 1996 по 2018 год по данным о режиме ветра, архива метеоизмерений сайта gr5.ru [6; 7; 8; 9; 10]. По данным архива наблюдений были получены среднегодовая скорость ветра, сезонный и суточный ход скорости ветра, относительная повторяемость скоростей по градациям; произведен расчет основных энергетических характеристик ветра. Обработка данных производилась средствами программного пакета Microsoft Excel.

Согласно методике, изложенной в руководящем документе «Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок», класс открытости опорной станции (по В.Ю. Милевскому) должен быть не менее 6б (таблица 1) [21].

Таблица 1 - Классы открытости метеостанций по В.Ю. Милевскому [21]

Характеристика размещения	Форма рельефа		
	выпуклая	плоская	вогнутая
Вблизи от водной поверхности			
Открытое побережье: океана или внешнего моря			
внутреннего моря	12а	1 б	10 в
залива, большого озера	11а	1 б	9в
большой реки	10а	9 б	8в
Вдали от водной поверхности			
Ниже ветроизмерительного прибора: нет элементов защищенности			
отдельные элементы защищенности	8а	7 б	6в
среди элементов защищенности	7а	6 б	5в
Выше ветроизмерительного прибора: среди элементов защищенности	6а	5 б	5в
	4α	4	4γ
		β	

Средняя скорость ветра характеризует его интенсивность и определяет эффективность использования энергии ветра. Использование ветроэнергетических установок считается перспективным, при среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м превышающей 4-5 м/с [4; 20]. Одним из благоприятных условий использования ветроэнергетики являются небольшие значения коэффициента вариации, показывающего изменчивость скорости ветра во времени. Если значения коэффициента не превышают 0,5, условия считаются благоприятными; при значениях менее 0,3 весьма благоприятными [21].

Помимо среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м важны также аналогичные показатели для других высот. Привести скорость ветра к определенной высоте можно используя формулу 1:

$$v_1 = v_\phi \cdot \left(\frac{h_1}{h_\phi} \right)^m, \quad (1)$$

где v_1 – скорость ветра, м/с, на высоте h_1 , м; v_ϕ – скорость ветра, м/с, на высоте флюгера h_ϕ , м; m – показатель степени, принимаемый равным 0,2 [2].

Одной из важнейших характеристик, используемых при определении ветроэнергетического потенциала, является относительная повторяемость скоростей по градациям. Она показывает, какую часть рассматриваемого периода ведем имел определенную скорость. Относительная повторяемость по фактическим данным вычисляется как отношение числа замеров r_i , приходящейся на i -й интервал скорости, к общему числу замеров скорости R (формула 2) [2].

$$t_i = \frac{r_i}{R}, \quad (2)$$

Для определения потенциала на определенной высоте необходимо знать повторяемость ветра по градациям на этой высоте. Согласно монографии «Использование энергии ветра в районах Севера», метеостанции севера Европейской части России можно разделить на три типа, в зависимости от распределения относительной повторяемости градаций ветра [4]. В соответствии с этим разделением, метеостанции Канин нос и Шойна относятся к I типу, а Абрамовский маяк, Зимнегорский маяк и Несь к типу II. Относительная повторяемость t , для данных типов, рассчитывается по формулам 3, 4:

$$\text{I тип} \quad t = 1,038 \cdot \frac{\Delta v}{\dot{v}} \cdot \left(\frac{v}{\dot{v}}\right)^{0.5} \cdot \exp\left[-0,547 \cdot \left(\frac{v}{\dot{v}}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$\text{II тип} \quad t = 0,784 \cdot \frac{\Delta v}{\dot{v}} \cdot \left(\frac{v}{\dot{v}}\right)^{0.2} \cdot \exp\left[-0,408 \cdot \left(\frac{v}{\dot{v}}\right)^2\right], \quad (4)$$

где Δv – интервал градации скорости; v – скорость ветра, повторяемость которой ищется в интервале от $v - \frac{\Delta v}{2}$ до $v + \frac{\Delta v}{2}$; \dot{v} – средняя скорость на рассматриваемой высоте, м/с [4].

Средняя удельная мощность ветрового потока является энергетической характеристикой ветра, характеризующей энергию ветрового потока. Рассчитывается на основе данных о повторяемости скорости ветра по градациям, по формуле 5:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_i, \quad (5)$$

где $\langle P \rangle$ – средняя удельная мощность ветрового потока, Вт/м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³, в данной работе используются значения плотности воздуха, соответствующие параметрам стандартной атмосферы по ГОСТ 4401-81; v_i – скорость ветра в i -м интервале; t_i – повторяемость скоростей ветра в i -м интервале [2].

Валовый потенциал – часть энергии, доступная для использования на площади территории в течение одного года. Валовый потенциал ветровой энергии территории определяется исходя из средней мощности ветрового потока по формуле 6:

$$W_g = \langle P \rangle \cdot T \cdot \frac{S}{20}, \quad (6)$$

где T – количество часов в году, 8760 ч; S – площадь зоны, м²; 20 – числовой коэффициент, учитывающий восстановление ветрового потока после обтекания вертикального препятствия высотой H , на расстоянии $20H$ после препятствия [2].

Технический потенциал ветровой энергии характеризует количество электрической энергии, которое может быть получено при использовании ветровых ресурсов территории. В данной работе, для оценки технического потенциала, использовался показатель годовой выработки электроэнергии с 1 км² территории, определяемый по формуле 7:

$$Q = 1.85 \cdot T \cdot \left(\sum_{v_{min p}}^{v_p} t_i \cdot v_i^3 + v_p^3 \cdot \sum_{v_p}^{v_{max p}} t_i \right), \quad (7)$$

где Q – годовая выработка с 1 км² территории, кВт*ч; T – количество часов в году; v_i – скорость ветра в i -м интервале; t_i – повторяемость скоростей ветра в i -м интервале; v_p – расчетная скорость ветра [4].

При определении годовой выработки используется показатель расчетной скорости ветра v_p , принимаемый за 1,5-1,6 от среднегодовой. Такие значения расчетной скорости позволяют обеспечить 3000 часов в год работы ветрогенератора в режиме установленной мощности [4]

В рамках данной работы также проводилась оценка эксплуатационных показателей реальных ветроэнергетических установок, а именно их годовая выработка. Данный показатель рассчитывается по формуле:

$$W = \sum_{v_i=v}^{v_i=v_{max}} N_i \cdot T_i, \quad (8)$$

где W – выработка ветроагрегата, кВт*ч; v_i – скорость ветра, входящая в интервал от v_0 до v_{max} , соответствующий интервалу рабочих скоростей ветроэнергетической установки; N_i – мощность агрегата, развиваемая при скорости ветра v_i ; T_i – число часов работы агрегата при скорости ветра v_i [21].

При оценке эффективности работы ветроэнергетической установки также используются данные о повторяемости скоростей ветра по градациям. Необходимо знание продолжительности по времени диапазона рабочих скоростей, то есть скоростей ветра, при которых установка вырабатывает электричество, а также продолжительности диапазона скоростей, при которых установка работает в режиме установленной мощности. Ветроэнергетическая установка может работать достаточно эффективно, если относительная продолжительность диапазона рабочих скоростей в течение сезона составляет не менее 40 %. Также определяется повторяемость энергетических затиший, то есть продолжительность диапазона скоростей, при которых установка не производит

электричество. Для эффективного использования ветроустановки, относительная продолжительность энергетических затиший должна составлять не более 20-30 % [21].

Важной характеристикой места размещения ветроэнергетической установки является отсутствие или незначительная повторяемость опасных явлений ветрового режима [21]. К опасным для ветроэнергетики явлениям ветрового режима относятся буревые периоды и ураганный ветер. В буревой период скорость ветра превышает 20 м/с, а за ураганный принимается ветер, со скоростью выше 33 м/с. Согласно типовому перечню опасных явлений, ветры скоростью более 20 м/с, либо порывами более 25 м/с соответствуют опасному явлению сильный ветер [17].

2 ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

2.1 Физико-географическая характеристика района исследования

Район исследования данной работы – северо-восточная часть Архангельской области и западная часть полуострова Канин. А именно побережье Белого моря от Двинской до Мезенской губы (Зимний берег и Абрамовский берег Белого моря), и западное побережье полуострова Канин от Мезенской губы до мыса Канин нос (Конушинский берег и Канинский берег). В качестве опорных метеостанций выбраны метеостанции Абрамовский маяк, Зимнегорский маяк, Канин нос, Несь и Шойна (рисунок 1).



Рисунок 1 – Карта-схема расположения опорных метеостанций

Архангельская область расположена на севере Европейской части России. Помимо континентальной части области, к её территории принадлежат также острова и архипелаги Северного Ледовитого океана, а именно: острова Колгуев и Вайгач, архипелаги

Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, Соловецкие острова в Белом море. Рельеф континентальной части территории преимущественно равнинный, с высотами до 200-250 м. Выделяются несколько холмистых и грядовых возвышенностей с высотами до 500 м. В рельефе островной части преобладают высоты до 600-800 м. Наивысшая точка Архангельской области – г. Безымянная на архипелаге Новая Земля, её высота 1547 м. Архангельская область и Ненецкий автономный округ омываются водами Белого, Баренцева и Карского морей [1]. Большая часть района расположена вблизи северного полярного круга, полуостров Канин нос полностью расположен за полярным кругом [5]. Рельеф района преимущественно равнинный с невысокими возвышенностями: Беломорско-Кулойским плато, высотой до 228 м, и кряжем Канин Камень, высотой до 242 м [1].

Климат Архангельской области, умеренный континентальный. Для климата характерен холодный период, продолжительность которого в северо-восточных районах области превышает продолжительность теплого на 3-29 дней [18]. Зима в прибрежных районах более мягкая, чем на остальной территории, лето, наоборот, более прохладное. Наиболее часто осадки отмечаются в осенне-зимний период, но наибольшее их количество выпадает летом. Климат Ненецкого Автономного округа субарктический. Среднегодовая температура воздуха на всей территории отрицательная. Зима суровая и продолжительная, лето короткое и прохладное. Островные территории Северного Ледовитого океана характеризуются арктическим климатом. Более подробно климат исследуемого района рассмотрен в п. 2.2.

Гидрологическая сеть района исследования представлена малыми реками бассейна Белого моря и устьевой частью реки Мезень. Для территории характерно большое количество небольших озер, а также заболоченность, особенно сильно она распространена в районе Мезенской губы и на полуострове Канин.

Территория района исследования находится в двух природных зонах. Зимний берег Белого моря расположен в северной подзоне тайги, лишь небольшая его часть на побережье Мезенской губы занята кустарниковой тундрой. Большую часть полуострова Канин занимает кустарниковая тундра, на юге распространена лесотундра.

Почвенный покров района исследования характеризуется выраженной зональностью в распространении различных типов почв. В северной части района, в зоне тундры на полуострове Канин, распространены тундровые глеевые и болотно-тундровые почвы. На юге, в таежной зоне, распространены подзолистые, торфянисто-подзолистые, и болотные торфяные почвы. Зональность также характерна для растительного покрова. В таежной зоне распространены такие древесные породы, как ель сибирская (*Picea obovata*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*). В зоне тундры растительный покров представлен мхами, лишайниками и небольшими кустарниками. Кроме того, на заболоченных территориях встречается болотная растительность [1].

На арктических территориях Архангельской области обитают разнообразные морские млекопитающие, а также белые медведи (*Ursus maritimus*). Зона тундры населена мелкими млекопитающими, северными оленями (*Rangifer tarandus*). Животный мир таежной части области представлен характерными для этой природной зоны грызунами, пушным зверем, парнокопытными, крупными хищными млекопитающими. В области обитает большое количество различных видов птиц, проходят пути миграции перелетных птиц [1].

На территории области расположено 111 особо охраняемых природных территорий, общей площадью более 11 млн. га. Среди них: 1 заповедник, 4 национальных парка, 33 заказника, 66 памятников природы, 2 дендрологических сада, 1 ботанический сад, 4 охраняемых природных территории местного значения. 8 особо охраняемых природных территорий имеют федеральный статус. ООПТ регионального значения призваны сохранить редкие и типичные

участки экосистем, редкие виды растений и животных в их естественной среде обитания, традиционные трассы пролета и зимовок птиц, пути прохода и нерестилища рыб и другие природные явления и процессы [19]. В рассматриваемом районе Архангельской области и Ненецкого автономного округа расположено два заказника и один памятник природы.

2.2 Краткая климатическая характеристика района исследования

Район исследования расположен в двух климатических зонах. Полуостров Канин находится в субарктическом климатическом поясе. Остальная территория района расположена в атлантико-арктической области умеренного пояса. Так как район расположен вблизи полярного круга, климат здесь формируется в условиях ограниченного поступления солнечной радиации в зимний период. Северная часть района находится за полярным кругом, зимой здесь наблюдается полярная ночь. Годовой радиационный баланс на севере полуострова Канин менее 20 ккал/см² за год, на остальной территории 20-25 ккал/см² в год [1].

Среднегодовая температура воздуха на рассматриваемой территории составляет 0...+2 °С [6; 7; 8; 9; 10]. Продолжительность безморозного периода 90-100 дней. Максимум годового хода температуры воздуха приходится на июль, минимум в январе (рисунок 2). Средняя температура воздуха зимой -8...-14°С, а минимальные температуры могут составлять до -40...-50°С. Летом средняя температура +10...+12 °С. Максимальная температура воздуха может достигать +33...36 °С [18].

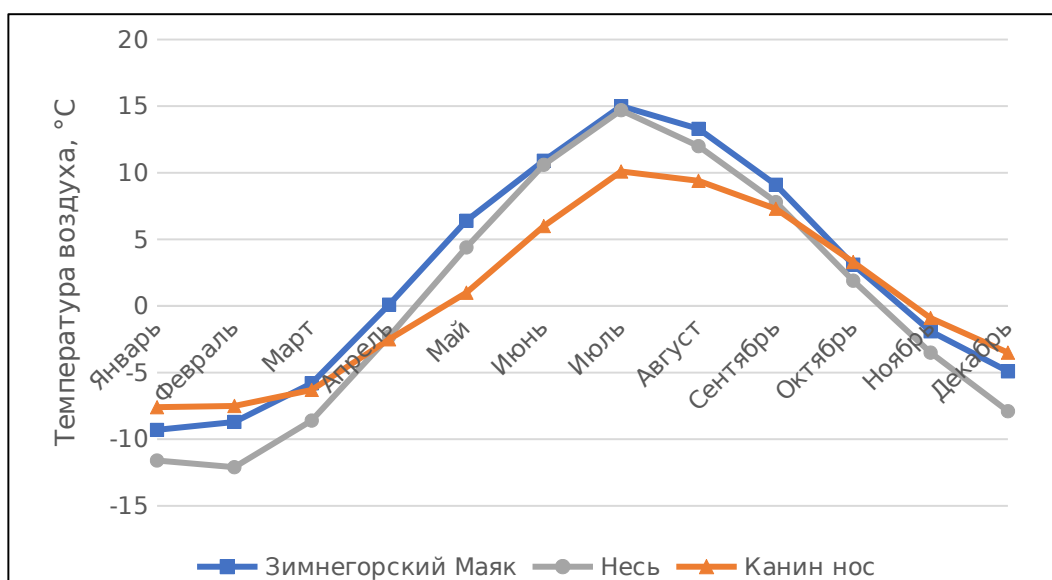


Рисунок 2 - Сезонный ход средней месячной температуры воздуха на рассматриваемых станциях за период с 2006 по 2018 год

Архангельская область находится в зоне активной циклонической деятельности и частой смены воздушных масс. Особенно она интенсивна осенью и зимой. Часты вторжения воздушных масс с Атлантики. Летом они приносят похолодание, зимой наоборот потепление. Вторжение Атлантических масс сопровождается выпадением осадков. Проявляется влияние и Арктики. Арктические воздушные массы становятся причиной сильных морозов зимой и заморозков летом. Также на территорию области вторгаются циклоны из субтропиков, приносящие потепление в любой период года, и континентальный воздух умеренных широт, теплый летом и холодный зимой [18].

Преобладающие направления ветра и его скорость зависит от сезонного состояния барического поля. В холодное время года ветровой режим формируется под влиянием исландского минимума. С сентября по март преобладают юго-восточные, южные, юго-западные ветры. Направления ветра весной неустойчивы. Летом преобладают ветры северного и северо-западного направлений. В целом за год в Архангельской области преобладают ветры южной четверти (рисунок 3). Среднегодовая скорость ветра 3-5 м/с, с зимним максимумом

годового хода [18]. Рассматриваемые в работе опорные метеостанции расположены в районах области, где среднегодовая скорость ветра превышает 4 м/с.

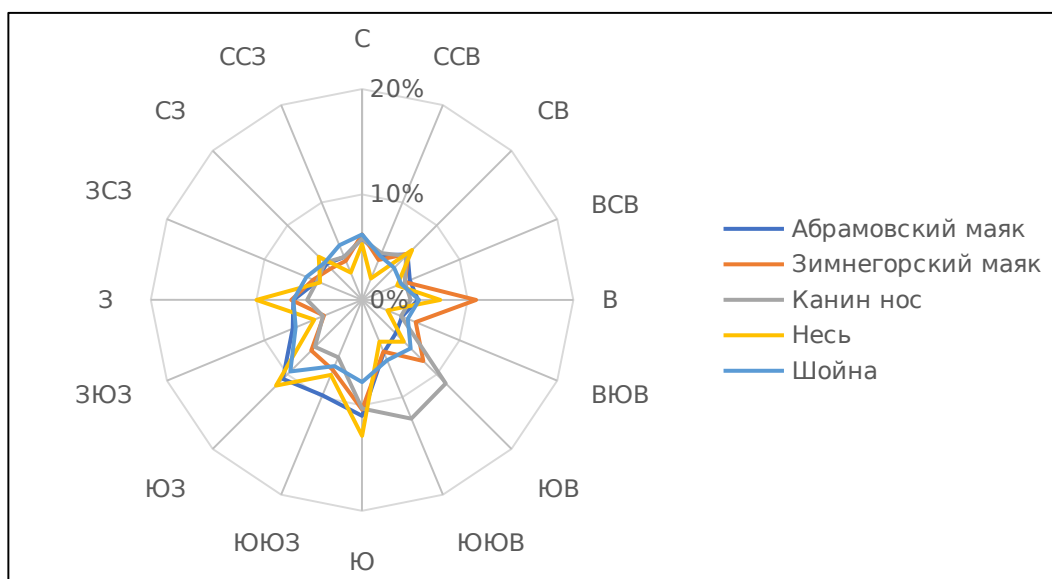


Рисунок 3 – Среднегодовая повторяемость направлений ветров на рассматриваемых станциях за 2006-2018 годы

Среднегодовое количество осадков рассматриваемой прибрежной территории составляет менее 500 мм. Максимум годового хода атмосферных осадков приходится на конец лета-осень и составляет 50-70 мм. Минимум весной, около 40 мм осадков. Относительная влажность воздуха в среднем за год около 80%, максимальные значения наблюдаются в октябре-ноябре. Снежный покров залегает 180-200 дней в году [18].

2.3 Особенности расселения и структуры экономики региона

Численность населения Архангельской области, включая Ненецкий автономный округ, составляет 1144119 человек, плотность населения 1,94 чел./км². Городское население составляет 78,75%, большая часть населения сосредоточена в крупных городах – Архангельск, Северодвинск, Котлас и др. Район исследования данной работы административно принадлежит Приморскому и Мезенскому районам Архангельской области, Заполярному району Ненецкого

автономного округа. Основное население этих районов проживает в сельских населенных пунктах, характеризующихся малой численностью населения и рассредоточенностью в пространстве (рисунок 4). Эти населенные пункты объединены в сельские поселения, всего в расположенных вблизи рассматриваемого побережья Белого моря населенных пунктах проживает более 4 тысяч человек постоянного сельского населения, без учета метеорологических станций и маяков, погранзастав, рыбацких поселков и прочего непостоянного населения [24].

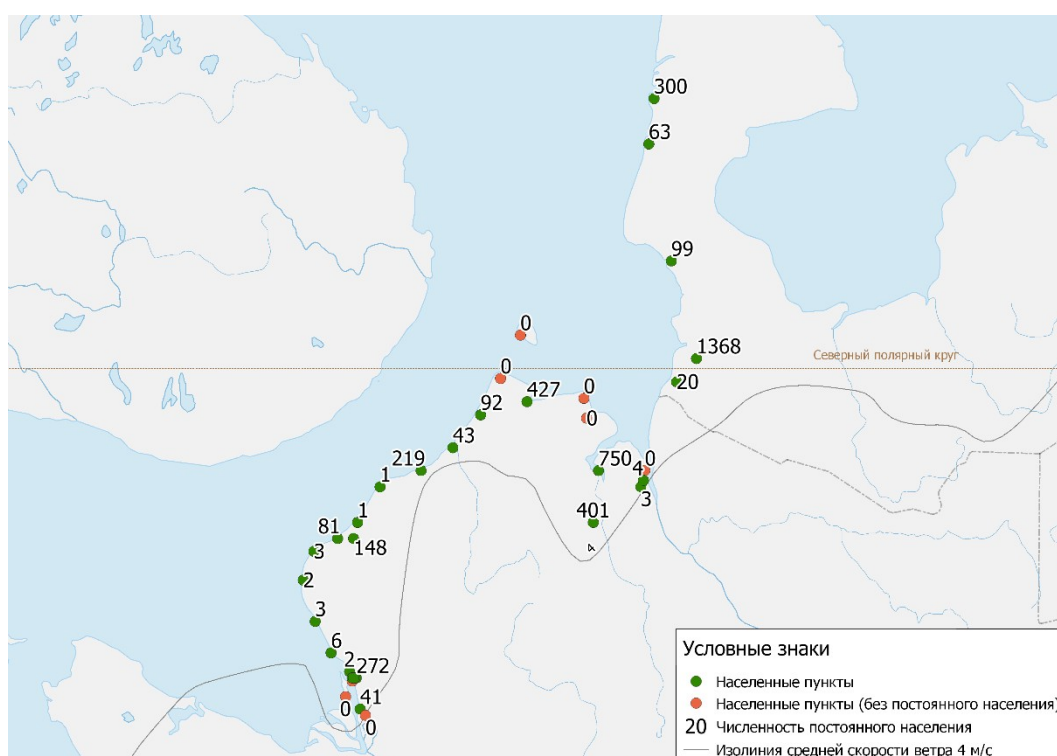


Рисунок 4 – Карта-схема прибрежных населенных пунктов Архангельской области и их численность населения

В структуре валового регионального продукта (ВРП) Архангельской области ведущую роль занимает обрабатывающая промышленность [11]. Одними из главных отраслей промышленности региона являются лесная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленности. Крупные предприятия расположены в Архангельске, Новодвинске, Коржаме. Развито машиностроение, в частности судостроение и судоремонт. Обрабатывающая

промышленность Архангельской области потребляет почти половину вырабатываемой в области электроэнергии. В структуре ВРП Ненецкого автономного округа основной является добывающая промышленность [11]. Основными добываемыми ресурсами является нефть и газ.

2.4 Состояние энергетики Архангельской области

Энергосистема области объединяет два основных энергоузла: Архангельский и Котласский. В Архангельский энергоузел входят Архангельская ТЭЦ, ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Северодвинска. В Котласский энергоузел входят блок-станции предприятий целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности. Также имеется Вельская газотурбинная ТЭЦ. Эти электростанции связаны воздушными линиями электропередач в единую сеть, которая не имеет непосредственной связи с объединенной энергосистемой Северо-Запада и связана с системами Вологодской области и Республики Коми [16]. В Ненецком автономном округе действует Нарьян-Марская газотурбинная станция, не имеющая связи с энергосистемой области. К централизованной системе энергоснабжения подключены в основном западные и южные районы области, в то время как в северных и восточных районах электроэнергия производится на автономных дизельных электростанциях (рисунок 5) [16].

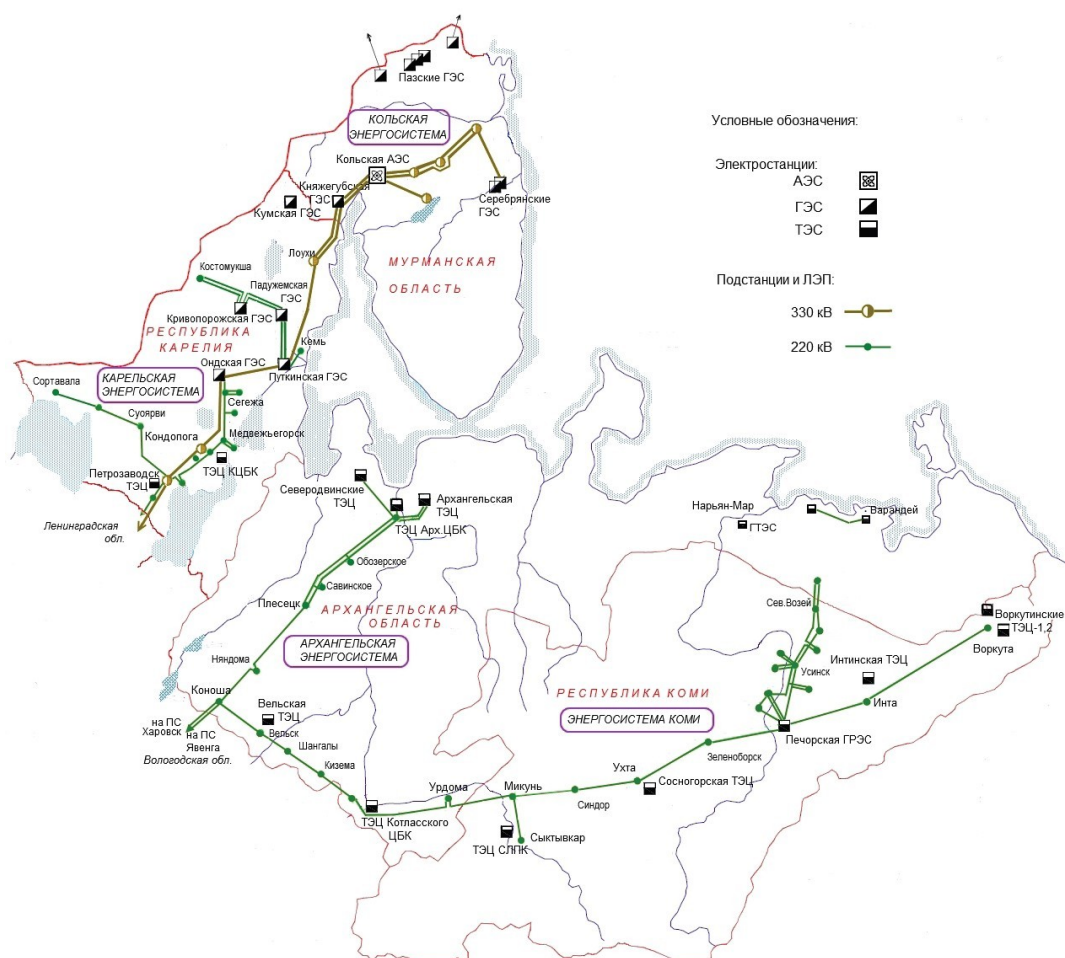


Рисунок 5 – Схема основных электроэнергетических объектов северо-запада РФ [16]

Ветроэнергетика в Архангельской области малоразвита и носит точечный характер. На острове Мудьюг ветроустановка очень малой мощности эксплуатируется на территории рыболовно-туристического комплекса, для освещения в зимнее время года. Автономные ветросолнечные осветительные установки очень малой мощности установлены на автомобильных дорогах в окрестностях г. Архангельска. Комбинированная ветросолнечная установка малой мощности используется для обеспечения электроэнергией опорного пункта национального парка Русская Арктика на мысе Желания о. Северный архипелага Новая Земля. В Ненецком автономном округе ветросолнечные установки смонтированы на некоторых маяках, взамен отработанных радиоизотопных термоэлектрических генераторов [12]. Для обеспечения энергией поселка Амдерма

используется ветродизельный комплекс с четырьмя ветрогенераторами GHRE 50 Arctic [3]. Среди северных регионов России активным использованием энергии ветра отличается Мурманская область. Например, в населенных пунктах сельского поселения Варзуга, Терского района Мурманской области, расположенных вблизи побережья белого моря, установлены комбинированные ветродизельные установки. В них используются генераторы ANTARIS мощностью 5 и 10 кВт [13].

3 КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

3.1 Ветровой режим района исследования

Рассмотрим ветровой режим исследуемой территории более подробно. Среднегодовые скорости ветра на рассматриваемых метеостанциях превышают 4 м/с (рисунок 6). Наибольшее значение, 7 м/с, этот показатель принимает на станции Канин нос, что связано с ее географическим положением на побережье внешнего моря. На станциях Шойна, Абрамовский маяк и Зимнегорский маяк, вследствие расположения на побережье внутреннего моря, средние скорости ветра ниже, чем на Канином носу и составляют 5,1-5,5 м/с. Минимальная среднегодовая скорость ветра на станции Несь, так как она расположена в отдалении от побережья. Средняя скорость ветра здесь составляет 4,4 м/с. Коэффициент вариации принимает благоприятные значения на станции Абрамовский маяк, где его значение составляет 0,48. На остальных станциях он превышает критерий благоприятности, максимальное значение составляет 0,59 на станции Зимнегорский маяк.

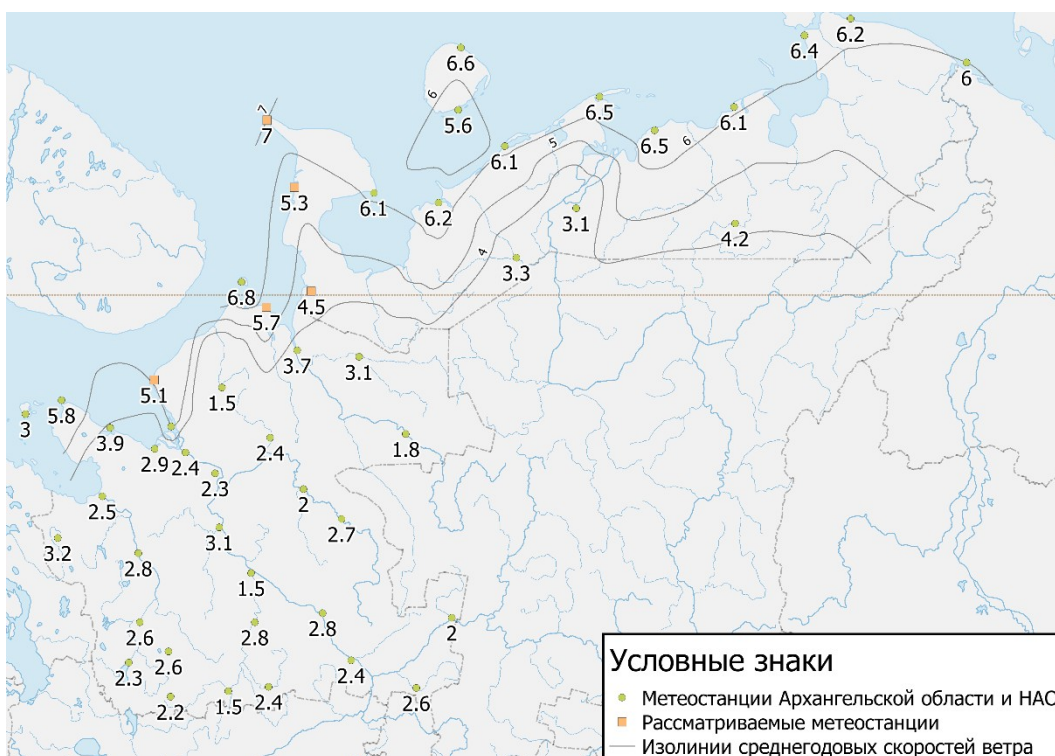


Рисунок 6 – Среднегодовые скорости ветра на метеостанциях Архангельской области и Ненецкого автономного округа

В сезонной динамике средних скоростей ветра на станциях Зимнегорский маяк, Абрамовский маяк и Канин нос отмечается минимум летом (в июле-августе) и максимум зимой (декабрь-январь) (рисунок 7). Зимний максимум связан с усилением циклонической активности в это время года. На станциях Шойна и Несь сезонный ход средней скорости ветра более сглаженный (рисунок 8). Тем не менее, здесь также прослеживается минимум в августе и максимум зимой. На станции Несь отмечается вторичный максимум в апреле, а в Шойне в июле. Зимний максимум средней скорости ветра совпадает с сезонным увеличением энергопоребления.

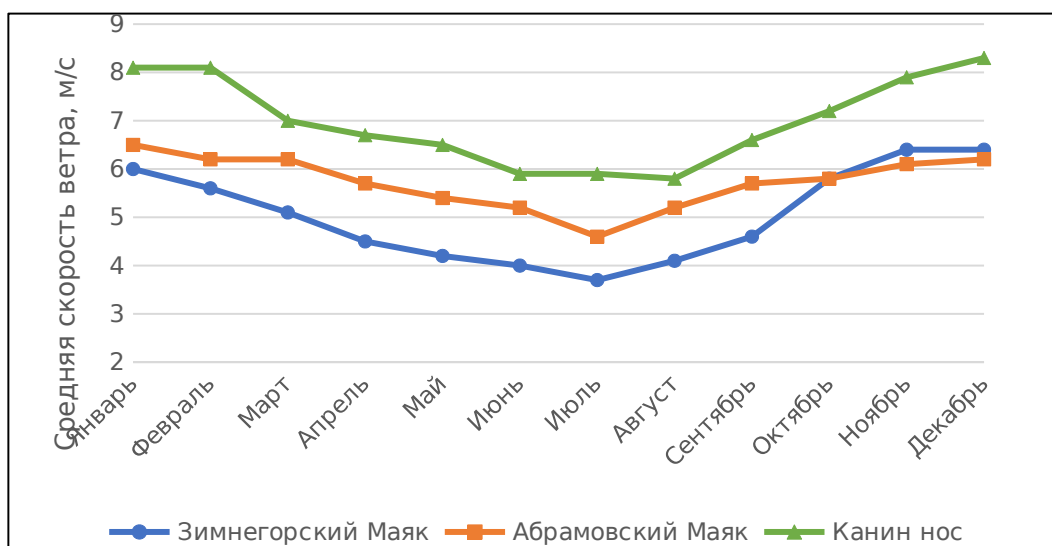


Рисунок 7 – Сезонный ход средней месячной скорости ветра за 2006-1018 год на станциях Зимнегорский маяк, Абрамовский маяк, Канин нос

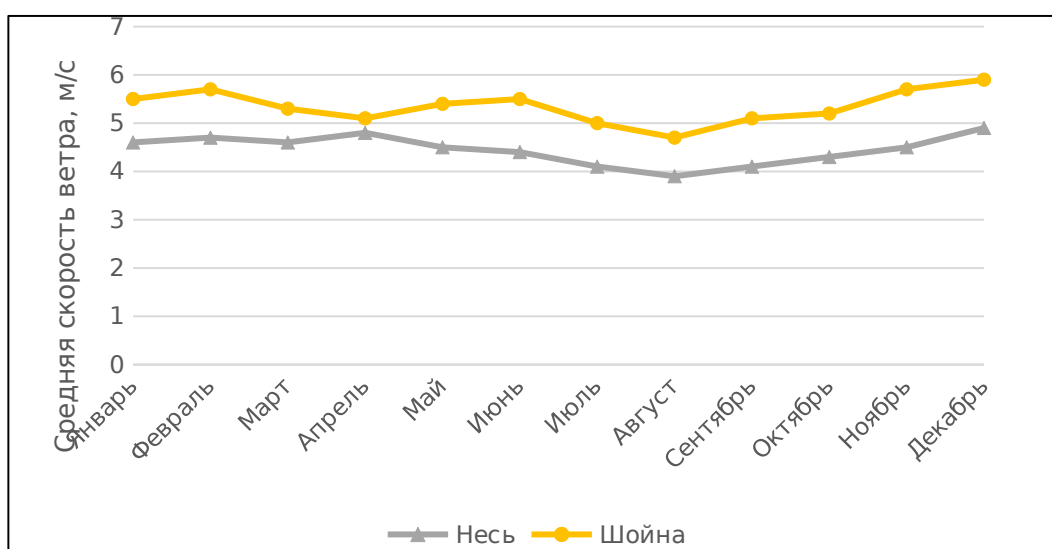


Рисунок 8 – Сезонный ход средней месячной скорости ветра за 2006-1018 год на станциях Несь, Шойна

Суточный ход средней скорости ветра в течение года на станциях Зимнегорский маяк, Абрамовский маяк и Канин нос довольно однородный, и закономерности не прослеживаются. Амплитуда средних суточных скоростей ветра на этих станциях максимальна в июле и достигает 1,2 м/с. На станциях Несь и Шойна в апреле и июле наблюдается понижение скорости в утренние часы и повышение в

вечерние. Наиболее это выражено в июле на станции Несь, амплитуда суточного хода составляет 2 м/с (рисунок 9).

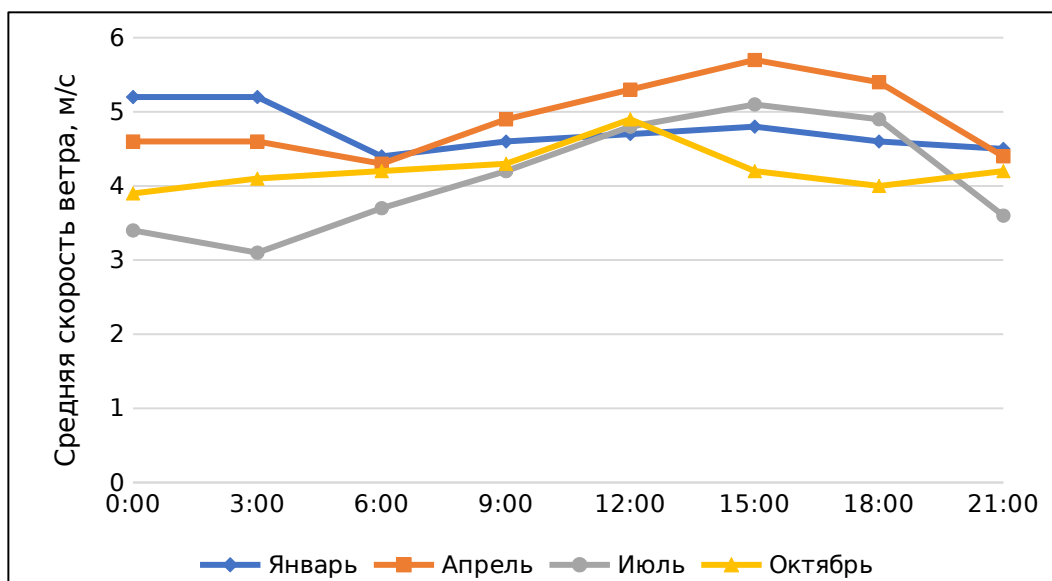


Рисунок 9 – Суточный ход средней скорости ветра по сезонам года на станции Несь за 2006-2018 год

Роза ветров на метеостанциях различается, но некоторые сходства присутствуют. На Абрамовском маяке и в Шойне в январе преобладают южные ветры (Рисунки 10, 14). Летом выделяются северные ветры в Шойне и северо-восточные на Абрамовском маяке. На этих двух метеостанциях, расположенных на побережье, довольно хорошо прослеживаются закономерности муссонной циркуляции воздуха: зимой преобладает ветер, дующий с материка, а летом наоборот – с моря.

На станции Зимнегорский маяк, расположенной на юго-западе исследуемого района, роза ветров нестабильна, в ней выделяются южное и восточное направления ветра (рисунок 11). В январе преобладают восточные ветры, в июле выделяются ветры южного и северо-восточного направлений. На Канином носу в январе и июле, также, как и в целом за год, преобладают ветры юго-восточного направления (рисунок 12). Здесь и на Зимнегорском маяке муссонные закономерности прослеживаются гораздо слабее, в основном в зимний

период года. На станции Несь зимой преобладают южные ветры, а летом северо-восточные (рисунок 13).

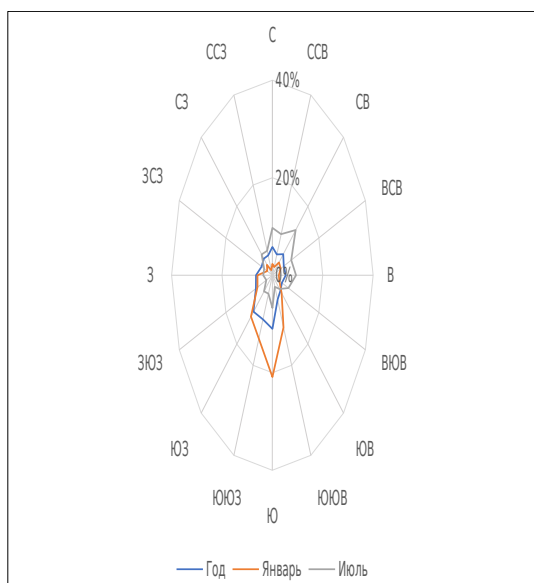


Рисунок 10 – Совмещенная роза ветров за год, январь и июль; Абрамовский маяк, за 2006-2018 г

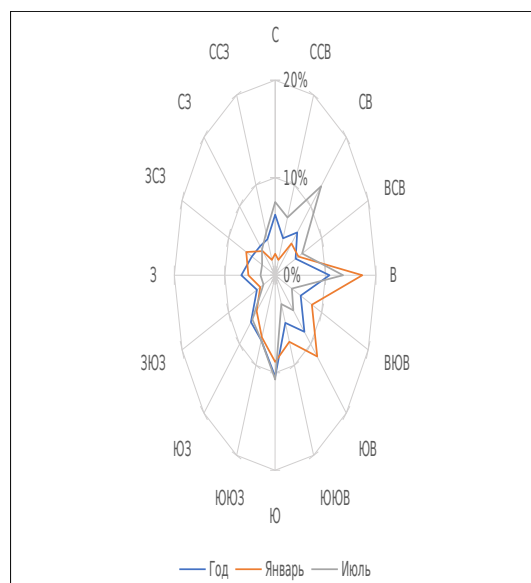


Рисунок 11 – Совмещенная роза ветров за год, январь и июль; Зимнегорский маяк, за 2006-2018 г

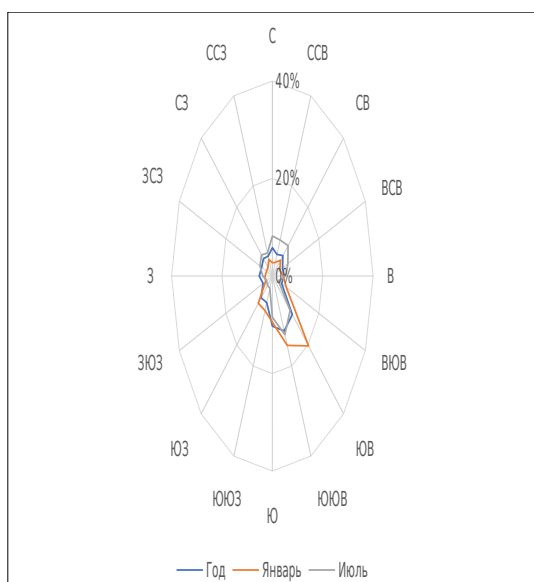


Рисунок 12 – Совмещенная роза ветров за год, январь и июль; Канин нос, за 2006-2018 г

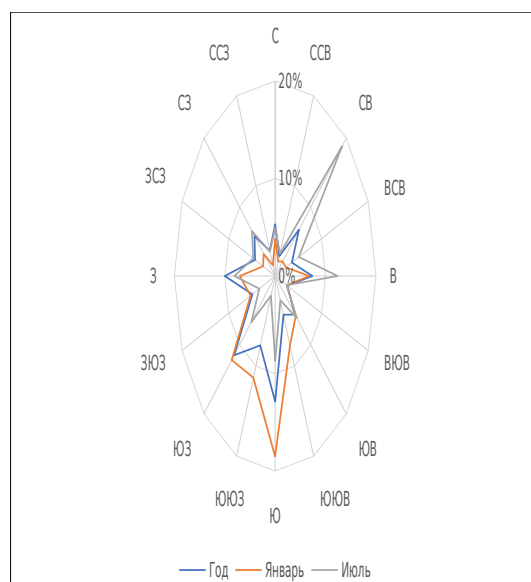


Рисунок 13 – Совмещенная роза ветров за год, январь и июль; Несь, за 2006-2018 г

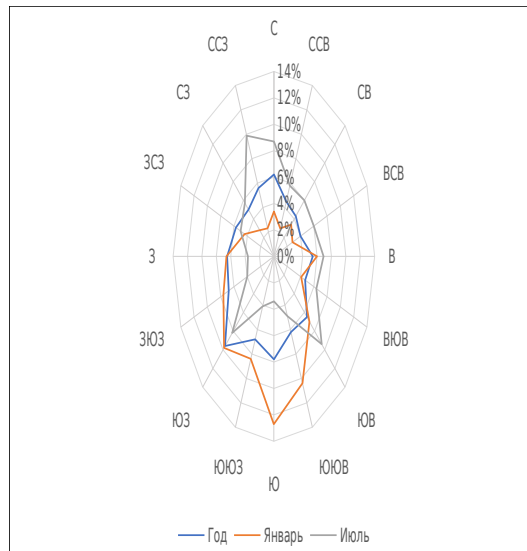


Рисунок 14 – Совмещенная роза ветров за год, январь и июль; Шойна, за 2006-2018 г

3.2 Валовый потенциал района исследования

Важной характеристикой, определяющей валовый потенциал ветровой энергии региона, является относительная повторяемость скоростей ветра по градациям. Для высоты 10 м повторяемость была определена по фактическим данным наблюдений ветра с использованием формулы (2). На рассматриваемых станциях, на высоте 10 м, ветры, имеющие максимальную повторяемость, входят в градации скоростей от 3 до 6 м/с. Повторяемость же ветров, превышающих 10 м/с довольно мала (рисунок 15).

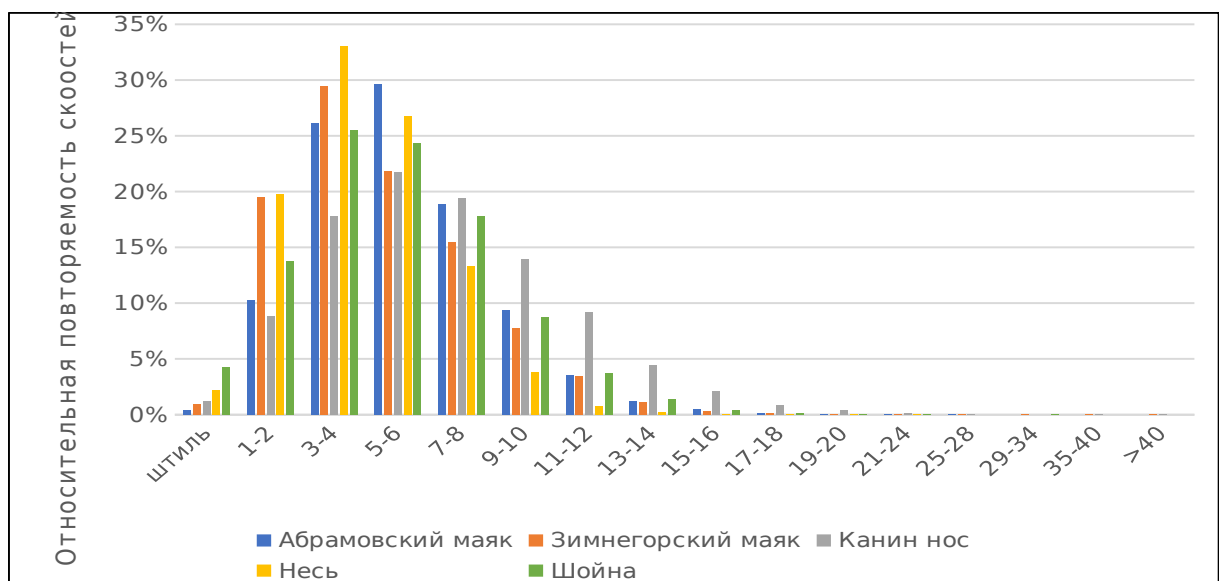


Рисунок 15 – Относительная повторяемость скоростей ветра по
градациям
на высоте 10 м, 2006-2018 год

Для характеристики повторяемости по градациям на высотах 25, 50 и 100 м, по формуле (1) была определена средняя скорость ветра для данных высот (таблица 2). Исходя из средней скорости ветра, по формулам (3) и (4) на данных высотах определена повторяемость скоростей по градациям. С использованием данных о повторяемости на разных высотах, по формуле (5) определена средняя удельная мощность ветрового потока и по формуле (6) определен валовый потенциал ветровой энергии. Характеристики ветрового потока, определяющие валовый потенциал территории, для высот 10, 25, 50 и 100 м представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики валового потенциала района исследования

Характеристика	Высота	Станция				
		Абрамовск ий маяк	Зимнегорск ий маяк	Канин нос	Несь	Шойна
Среднегодовая скорость ветра, м/с	10 м	5,7	5,1	7,0	4,4	5,3
	25 м	6,8	6,1	8,4	5,3	6,4
	50 м	7,8	7,0	9,6	6,1	7,4
	100 м	9,0	8,0	11,1	7,0	8,5
Средняя удельная мощность ветрового потока, Вт/м ²	10 м	200,9	177,1	408,6	102,8	199,3
	25 м	524,3	369,1	824,3	249,2	369,3
	50 м	790,2	556,4	1242,1	375,6	556,7
	100 м	1190,9	839,1	1868,4	566,5	839,7
Валовый потенциал территории, кВт*ч/ (м ² в год)	10 м	88,0	77,6	179,0	45,0	87,3
	25 м	229,6	161,7	361,0	109,1	161,8
	50 м	346,1	243,7	544,0	164,5	243,8
	100 м	521,6	367,5	818,3	248,1	367,8

Прослеживается зависимость валового потенциала от средней скорости ветра на рассматриваемых станциях. Максимальные его значения отмечаются на станции Канин нос, расположенной на

открытом побережье Баренцева моря и воронки Белого моря. Здесь наблюдаются максимальные для рассматриваемого района средние скорости ветра. Несколько ниже значения потенциала на станциях, расположенных на побережье Белого моря. Здесь следует отметить, что вследствие более низкой средней скорости ветра, потенциал на станции Шойна значительно ниже, чем на Абрамовском маяке и равен потенциалу Зимнегорского маяка, где средняя скорость ветра практически равна значениям станции Шойна. Минимальным потенциалом характеризуется станция Несь, обладающая минимальной скоростью ветра, из-за расположения на удалении от береговой линии.

3.3 Технический потенциал района исследования

Для оценки технического потенциала зоны была определена расчетная скорость ветра, затем по формуле (7) определена годовая выработка электроэнергии с 1 км² территории (таблица 3). Она характеризуется такими же особенностями в распределении по территории, что и валовый потенциал.

Таблица 3 – Характеристики технического потенциала района исследования

Характеристика	Высота	Станция				
		Абрамовск ий маяк	Зимнегорск ий маяк	Канин нос	Несь	Шойна
Расчетная скорость ветра, м/с	10 м	9,1	8,1	11,2	7,1	8,5
	25 м	10,9	9,7	13,4	8,5	10,3
	50 м	12,5	11,2	15,4	9,8	11,8
	100 м	14,4	12,8	17,7	11,2	13,5
Годовая выработка энергии с 1 км ² территории, млн кВт*ч	10 м	4,1	3,3	7,1	2,3	3,9
	25 м	6,6	5,2	10,7	4,1	5,9
	50 м	8,9	7,0	14,9	5,3	7,9
	100 м	12,1	9,2	20,1	7,1	10,9

При оценке реальных ветровых ресурсов необходимо использовать технические характеристики ветрогенераторов. В качестве примера рассматриваются следующие модели: установки малой мощности ANTARIS 5kW и ANTARIS 10kW, установленные в составе комбинированных установок в нескольких селах, на Беломорском побережье Мурманской области; ветрогенератор GHRE-50 Arctic, используемый в составе комбинированной станции в пос. Амдерма Ненецкого автономного округа. Некоторые характеристики данных установок представлены в таблице 4.

Рассмотрим показатели эффективности использования (таблица 5). Для установок №1 и 2 диапазоны рабочих и номинальных скоростей одинаковы. Продолжительность диапазона их рабочих скоростей на всех станциях почти одинакова составляет 84-85 %, кроме Шойны, где она достигает 90 %. Однако, продолжительность диапазона номинальных скоростей разнится от 5 до 15 %.

Таблица 4 - Технические характеристики некоторых моделей ветрогенераторов

ВЭУ	1	2	3
Модель	ANTARIS 5kW	ANTARIS 10kW	GHRE-50 Arctic
Номинальная мощность, кВт	5	10	50
Пусковая скорость ветра, м/с	1,8	2,4	3
Рабочая скорость ветра, м/с	12	12	13
Максимальная скорость ветра, м/с	15	15	25
Число лопастей ветроколеса	3	3	3
Диаметр ветроколеса, м	4	6,5	15,60

Относительная продолжительность диапазона рабочих скоростей для ВЭУ №3 изменяется в более широких пределах: от 74 % на станции Несь, до 89 % на Канином носу. Продолжительности работы в номинальном режиме для этой установки также невелики и составляют от 4,5 до 20 %.

Таблица 5 - Относительная продолжительность диапазонов скоростей ветра, соответствующих режимам работы ВЭУ

Диапазон скоростей	ВЭУ	Станция				
		Абрамовский маяк	Зимнегорский маяк	Канин нос	Несь	Шойна
Рабочие скорости ветра	1	84%	85%	85%	85%	90%
	2	84%	85%	85%	85%	90%
	3	81%	78%	89%	74%	84%
Номинальные скорости ветра	1	11%	8%	15%	5%	9%
	2	11%	8%	15%	5%	9%
	3	12%	8%	20%	4%	8%
Энергозатишья	1	10%	11%	4%	13%	7%
	2	10%	11%	4%	13%	7%
	3	18%	21%	10%	24%	15%

Таким образом, из-за особенностей ветрового режима территории, большую часть времени, рассматриваемые установки вырабатывают мощность ниже установленной, так как работают при скоростях ветра более низких, чем номинальная. Продолжительность диапазона номинальных скоростей на всех станциях ниже требуемых 40 %, а продолжительность энергозатиший превышает 20 % только на станциях Несь и Зимнегорский маяк, при использовании установки №3.

При оценке выработки использовались данные о мощности ветроагрегата, в зависимости от скорости ветра, полученные с сайтов производителей (таблица 6) [25; 26; 28]. По формуле (8) был произведен расчет годовой выработки единичного ветрогенератора рассматриваемых моделей.

Таблица 6 – Мощность (кВт), вырабатываемая рассматриваемыми ВЭУ в зависимости от скорости ветра

ВЭУ	Скорость ветра, м/с																								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	0,1	0,25	0,5	0,8	1,33	2	2,8	3,9	5	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0,25	0,75	1,25	2	3,33	5	7,2	9,5	10,9	12	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	2	5	9	15	22,5	30	36	42,5	46	48	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		

Результаты оценки представлены в таблице 7. В результате анализа можно отметить некоторые особенности. Во-первых, несмотря на то, что валовый и технический потенциал на Канином носу почти на 40 % выше, чем на Абрамовском маяке, предполагаемая годовая

выработка рассмотренными установками превышает показатели Абрамовского маяка лишь на 20 %. Вторая особенность заключается в том, что несмотря на более высокий потенциал Зимнегорского маяка, расчетная выработка здесь близка к показателям на станции Несь. Обе особенности объясняются тем, что, как было сказано выше, на данных станциях основная часть электроэнергии вырабатывается рассматриваемыми ВЭУ при низких скоростях ветра. Повторяемость этих скоростей на Абрамовском маяке и Неси выше, чем на Канином носу и Зимнегорском маяке соответственно, где выше повторяемость номинальных скоростей (рисунок 16).

Таблица 7 – Расчетная годовая выработка рассматриваемых ВЭУ, кВт*ч

ВЭУ	Станция				
	Абрамовский маяк	Зимнегорский маяк	Канин нос	Несь	Шойна
1	14143	12460	17582	10223	13676
2	31984	28534	39226	23821	31423
3	151769	127399	199787	101186	137245

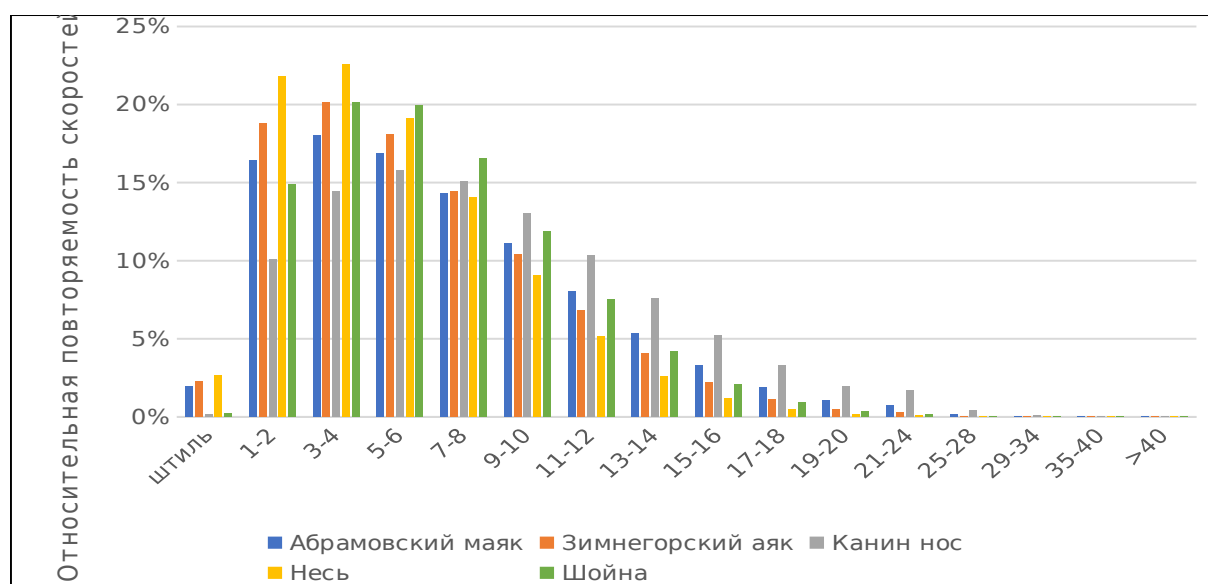


Рисунок 16 – Относительная повторяемость скоростей ветра по градациям на высоте 25 м, 2006-2018 год

Согласно данным Росстата, средний расход электроэнергии на бытовое потребление на душу населения в 2017 году составил 1060

кВт*ч [22]. При данной расчетной выработке, единичная ВЭУ №1 установленной мощностью 5 кВт может обеспечить электроэнергией на бытовые нужды 10-12 человек; ВЭУ №2, мощностью 10 кВт – 25-30 человек; ВЭУ №3, мощностью 50 кВт – 100-150 человек.

3.4 Повторяемость опасных для развития ветровой энергетики явлений погоды

Для безопасной работы ветроэнергетической установки, её месторасположение должно характеризоваться низкой повторяемостью ураганных ветров и буревых периодов. Общая повторяемость данных явлений представлена в таблице 8. Наибольшая повторяемость отмечается на станции Канин нос, где за исследуемый период было зарегистрировано 116 дней с буревыми периодами, из них 5 дней скорость ветра соответствовала ураганной. Наименьшая повторяемость опасных явлений на станции Несь – 4 дня за исследуемый период, ураганных ветров не отмечалось.

Таблица 8 – Количество дней с опасными явлениями ветрового режима, 2006-2018 год

Опасное явление	Станция				
	Абрамовский маяк	Зимнегорский маяк	Канин нос	Несь	Шойна
Буревые периоды	14	28	116	4	24
Ураганные ветры	1	4	5	0	1

В многолетней динамике наблюдений опасных скоростей ветра отмечается малая однородность (рисунок 17). В отдельные годы наблюдается большое их количество, в другие же буревых периодов может не быть вообще. Сезонный ход повторяемости буревых периодов совпадает с сезонной динамикой средней скорости ветра. Наиболее часто опасные явления наблюдаются в зимний период года (рисунок 18).

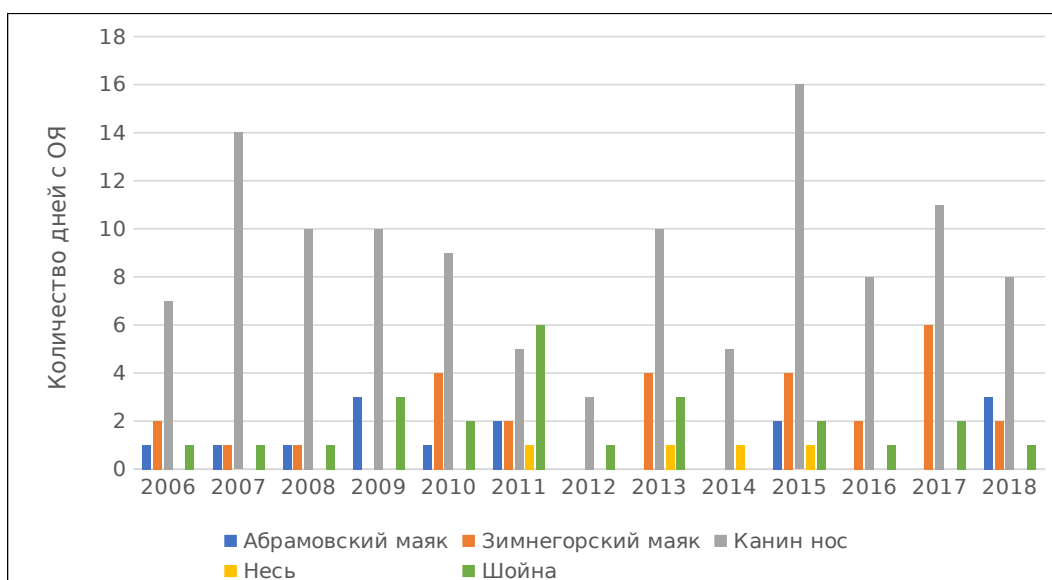


Рисунок 17 – Многолетняя повторяемость опасного явления за 2006-2018 год

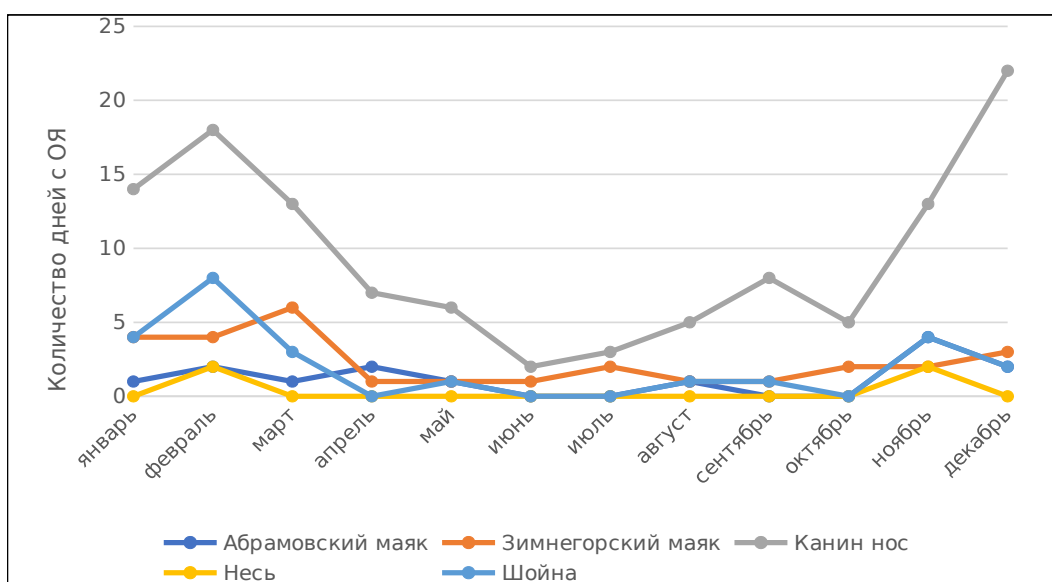


Рисунок 18 – Сезонная динамика повторяемости опасного явления за 2006-2018 год

В целом можно сказать, что ветровой режим района исследования достаточно безопасен для использования ветроэнергетических установок. Максимальная повторяемость опасных скоростей ветра, наблюдаемая на станции Канин нос, не превышает 9 дней в году, что соответствует относительной продолжительности около 2,4% в год. На остальных станциях

относительная продолжительность буревых периодов составляет менее 1%, а продолжительность ураганных ветров менее 0,1% в год.

3.5 Целесообразность развития ветровой энергетики в районе исследования

Исходя из результатов оценки можно сделать вывод, что северная часть Архангельской области обладает достаточно высоким ветроэнергетическим потенциалом. Среднегодовые скорости ветра и удельная мощность потока здесь сравнимы со значениями Северной Европы, американских Великих Равнин и китайской Внутренней Монголией [27; 31; 32]. В данных регионах ветровая энергия активно используется для производства электричества.

Факторы, препятствующие крупному промышленному развитию ветроэнергетики на севере Архангельской области, были названы в главе 1. Это суровые климатические условия; малая плотность населения; слабо развитая транспортная и энергетическая инфраструктура; отсутствие крупных промышленных потребителей энергии.

В связи с этим более целесообразным представляется использование энергии ветра для автономной генерации электроэнергии в удаленных населенных пунктах, с помощью ветроэнергетических установок малой мощности, в составе комбинированных установок. Основываясь на статистических данных о потреблении электроэнергии на душу населения для бытовых нужд, а также на проведенной оценке предполагаемой годовой выработке некоторых ветроагрегатов, можно предположить, что использование для генерации энергии ВЭУ №1, мощностью 5 кВт, будет целесообразно в поселениях с населением не более 50 человек; ВЭУ №2, мощностью 10 кВт, в населенных пунктах с населением 50-100 человек; ВЭУ №3, мощность 50 кВт, при населении более 100 человек. При дальнейшем проектировании ВЭС и выборе ВЭУ необходимо учитывать суровые климатические условия рассматриваемого района,

а именно экстремальные перепады температур в течение года, обледенение лопастей ветроколеса и прочее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки ветроэнергетических ресурсов Архангельской области были сделаны следующие выводы:

1. Северные районы Архангельской области обладают большим потенциалом для использования ветроэнергетических ресурсов;

2. Валовый потенциал рассматриваемого района сопоставим с показателями регионов мира, в которых активно развивается использование ветроэнергетических ресурсов в промышленных масштабах;

3. Наибольшим потенциалом из рассмотренных в работе станций обладает Канин нос, где наблюдается максимальная среднегодовая скорость ветра, а наименьшим Несь, где среднегодовая скорость ветра минимальная из рассмотренных станций;

4. В ветровом режиме территории преобладают ветры низких скоростей, не превышающих номинальную скорость ветра большинства ветроагрегатов, при которой они вырабатывают установленную мощность;

5. Реальные климатические ресурсы, доступные для выработки ветрогенераторами, зависят от их технических характеристик, из-за описанной выше особенности ветрового режима реальные ресурсы на рассмотренных станциях различаются слабее, чем потенциальные.

Арктическая зона Российской Федерации обладает значительным ветроэнергетическим потенциалом. Развитию ветроэнергетики в Арктике препятствует суровый климат, малая плотность населения, слабое развитие инфраструктуры, малое количество промышленных потребителей энергии. Архангельская область не является исключением. В рассматриваемом северном районе области, пригодном для развития ветроэнергетики, проживает более 4 тысяч человек. Большая часть населения проживает в сельских населенных пунктах с небольшим населением, которые часто удалены друг от

друга на значительное расстояние. Помимо проживания постоянного населения здесь также функционируют метеостанции, маяки.

Опираясь на это, а также на результаты оценки ветроэнергетических ресурсов, можно прийти к выводу о том, что в настоящее время развитие промышленного использования ветровых ресурсов территории с использованием ветропарков высокой мощности нецелесообразно в связи с малым населением и отсутствием в районе промышленных потребителей. Создание ветропарков, подключенных к централизованной системе энергоснабжения области потребует обустройства инфраструктуры и крупных денежных вложений.

Наиболее целесообразной является автономная генерация с использованием комбинированных установок, где помимо ветровой энергии используются и традиционные дизельгенераторы, а также иные возобновляемые источники энергии. Комбинированные установки не позволяют полностью отказаться от дорогостоящего дизельного топлива, но позволяют снизить его потребление. Опыт эксплуатации подобных установок уже существует в Мурманской области, где несколько ВЭУ функционируют на Терском берегу Белого моря, в селах с населением менее 100 человек. Для этих моделей ветрогенераторов, а также для модели, используемой в ветродизельном комплексе пос. Амдерма были проведены расчеты годовой выработки электроэнергии, показавшие, что их можно достаточно эффективно эксплуатировать в населенных пунктах района исследования.

Суровый климат рассматриваемой территории обуславливает определенные требования к выбору моделей ВЭУ, а именно использование специальных арктических моделей. Значительные перепады температур в течение года требуют от ветроагрегата широкого диапазона рабочих температур. Большинство населенных пунктов находится в прибрежной зоне, поэтому необходимо учитывать возможное обледенение лопастей ветроколес. Опасные скорости

ветра представляют меньшую угрозу, так как их повторяемость довольно мала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атлас Архангельской области. – М.: ГУГК, 1976. – 72 с.
2. Безруких, П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие) / П.П. Безруких; М.: - ИД «ЭНЕРГИЯ». - 2010. - 320 с.
3. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х. Бердин, А.О. Кокорин, Г.М. Юлкин, М.А. Юлкин. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 80 с.
4. Зубарев, В. В. Использование энергии ветра в районах Севера: Состояние, условия эффективности, перспективы / Зубарев, В. А. Минин, И. Р. Степанов; АН СССР, Кол. науч. центр им. С. М. Кирова, Науч. совет по возобновляемым источникам энергии. - Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1989. - 205 с.
5. Физико-географический атлас мира. – М.: ГУГК, 1964. – 250 с.
6. Архив погоды в Абрамовском Маяке [Электронный Ресурс] // Расписание Погоды – Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Абрамовском_Маяке, свободный (дата обращения: 20.01.2019)
7. Архив погоды в Зимнегорском [Электронный Ресурс] // Расписание Погоды – Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Зимнегорском, свободный (дата обращения: 20.01.2019). – Загл. с экрана.
8. Архив погоды в Неси [Электронный Ресурс] // Расписание Погоды – Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Неси, свободный (дата обращения: 20.01.2019). – Загл. с экрана.
9. Архив погоды в Шойне [Электронный Ресурс] // Расписание Погоды – Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шойне, свободный (дата обращения: 20.01.2019). – Загл. с экрана.
10. Архив погоды на мысе Канин Нос [Электронный Ресурс] // Расписание Погоды – Режим доступа:

https://rp5.ru/Архив_погоды_на_мысе_Канин_Нос, свободный (дата обращения: 20.01.2019). – Загл. с экрана.

11. Валовой региональный продукт [Электронный Ресурс] // Архангельскстат – Режим доступа: http://arhangelskstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/arhangelskstat/ru/statistics/grp/, свободный (дата обращения: 20.04.2019). – Загл. с экрана.

12. Возобновляемая энергетика Архангельской области (Реестр установок в Архангельской области, работающих на возобновляемых источниках энергии) [Электронный Ресурс] – Электрон. дан. – Мурманск, 2015. – 47 с. – Режим доступа: <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2016/02/renewable-energy-arkhangelsk-region-2015.pdf>, свободный (дата обращения: 04.02.2019). – Загл. с экрана.

13. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [Электронный Ресурс] // Агентство энергетической эффективности Мурманской области – Режим доступа: http://aeemo.ru/metodicheskie_ma/vozobnovlyaemye/, свободный (дата обращения: 17.01.2019). – Загл. с экрана.

14. Горюнов, О.А. Перспективы применения ветроэнергетических установок для энергообеспечения объектов газовой промышленности в районах Крайнего Севера [Электронный Ресурс] / О.А. Горюнов, Ю.А. Назарова // ТЕРРИТОРИЯ НЕФТЕГАЗ – 2015. – №12. – С. 146-150 – Электрон. журн. – Режим доступа: <http://neftegas.info/upload/iblock/50f/50f8d2c01c387361a3ee1e25e8c49559.pdf>, свободный (дата обращения: 20.03.2019). – Загл. с экрана.

15. Елистратов, В. В. Возобновляемая энергетика [Электронный ресурс]: монография / В.В. Елистратов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2013. – 307 с. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3468.pdf>, свободный (дата обращения: 06.01.2019). – Загл. с экрана.

16. Коновалова, О. Е. Современное состояние энергоснабжения Архангельской области [Электронный Ресурс] // Труды Кольского научного центра РАН - 2017. - №8-15 (8) - С. 15-24 - Электрон. журн. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-energосnabzheniya-arhangelskoy-oblasti>, свободный (дата обращения: 18.01.2019). - Загл. с экрана.

17. Критерии ОЯ [Электронный Ресурс] // Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды - Режим доступа: <http://www.sevmeteo.ru/weather/criteria.php>, свободный (дата обращения: 03.03.2019). - Загл. с экрана.

18. Общая характеристика климата Архангельской области и Ненецкого автономного округа. [Электронный Ресурс] - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: <http://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf>, свободный (дата обращения: 10.01.2019). - Загл. с экрана.

19. Особо охраняемые природные территории регионального значения [Электронный Ресурс] // ГБУ Архангельской области "Центр природопользования и охраны окружающей среды" - Режим доступа: <http://eco29.ru/oopt/oopt-ao>, свободный (дата обращения: 22.04.2019). - Загл. с экрана.

20. Перспективы ветроэнергетического рынка в России [Электронный Ресурс] / Штефан Гзенгер, Роман Денисов - Электрон. текстовые дан. - 2017. - 30 с. - Режим доступа: <https://www.wwindea.org/wp-content/uploads/2017/06/170612-FES-Windenergie-rus-print.pdf>, свободный (дата обращения: 19.03.2019). - Загл. с экрана.

21. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. [Электронный Ресурс] РД 52.04.275-89 - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.04.275_89.pdf, свободный (дата обращения: 20.12.2018). - Загл. с экрана.

22.Производство и потребление электроэнергии в Российской Федерации в 2017 году [Электронный Ресурс] // Агентство экономической информации ПРАЙМ - Режим доступа: <https://1prime.ru/science/20181115/829538943.html>, свободный (дата обращения: 05.05.2019). - Загл. с экрана.

23.Смоленцев, Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации [Электронный Ресурс] // Арктика: экология и экономика - 2012. - №3 (7). - С. 22-29 - Электрон. журн. - Режим доступа: [http://ibrae.ac.ru/docs/3\(7\)/22-29.pdf](http://ibrae.ac.ru/docs/3(7)/22-29.pdf), свободный (дата обращения: 20.03.2019). - Загл. с экрана.

24.Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям [Электронный Ресурс] // Федеральная служба государственной статистики - Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/afc8ea004d56a39ab251f2bafc3a6fce, свободный (дата обращения: 20.04.2019). - Загл. с экрана.

25.ANTARIS 10.0 kW [Electronic resource] // BRAUN Windturbinen GmbH- Mode of access: <https://www.braun-windturbinen.com/products/antaris-small-wind-turbines/antaris-10-kw/>, free access (05.02.2019). - Title from screen.

26.ANTARIS 5.5 kW [Electronic resource] // BRAUN Windturbinen GmbH- Mode of access: <https://www.braun-windturbinen.com/products/antaris-small-wind-turbines/antaris-5-5-kw/>, free access (05.02.2019). - Title from screen.

27.European Wind Atlas [Electronic resource] // DTU Orbit - The Research Information System - Electronic text data. - Mode of access: http://orbit.dtu.dk/files/112135732/European_Wind_Atlas.pdf, free access (18.03.2019). - Title from screen.

28.FD16-50 wind turbine - FD16 series [Electronic resource] // Shanghai Ghrepower Green Energy Co., Ltd.- Mode of access:

<http://www.ghrepower.com/en/wind-powershow.php?cid=23&id=61>, free access (01.02.2019). - Title from screen.

29.MARKET AND INDUSTRY TRENDS [Electronic resource] // RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT- Mode of access: http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_03/chapter_03/, free access (17.03.2019). - Title from screen.

30.POLICY LANDSCAPE [Electronic resource] // RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT- Mode of access: http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_02/chapter_02/, free access (17.03.2019). - Title from screen.

31.The Power of Renewables: Opportunities and Challenges for China and the United States [Electronic resource] // The National Academies Press - Mode of access: <https://www.nap.edu/read/12987/chapter/4#61>, free access (22.03.2019). - Title from screen.

32.Wind Maps [Electronic resource] // Geospatial Data Science - Mode of access: <https://www.nrel.gov/gis/wind.html>, free access (18.03.2019). - Title from screen.

Сведения о самостоятельности выполнения работы

Работа «Возможность использования ветроэнергетики в отдаленных поселениях Архангельской области» выполнена мной самостоятельно.

Используемые в работе материалы и концепции из публикуемой литературы и других источников имеют ссылки на них.

Один печатный экземпляр работы и электронный вариант работы на цифровом носителе переданы мной на кафедру/отделение.

«11» июня 2019 г.

С. Д. Прасолов

(подпись)