

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ  
Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ВЫРАБОТКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ НА  
КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ**

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Научный руководитель	_____	_____	<u>М.Ф. Носков</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность, ученая степень	
Выпускник	_____		<u>А.П. Храмцова</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата		
Рецензент	_____	Зам. начальника СКД <u>Колымской ГЭС</u>	<u>К.Л. Фролов</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность, ученая степень	
Нормоконтроль	_____		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата		

Саяногорск; Черёмушки 2020

## АННОТАЦИЯ

**Тема магистерской диссертации:** Оценка надежности гибридных систем выработки электроэнергии, предназначенных для работы на Крайнем Севере.

**Объем диссертации** составляет 63 страницы, содержит 17 иллюстраций и 12 таблиц. Список литературы состоит из 41 наименования.

**Объектом исследования** при написании работы послужили данные о надежности гибридных систем выработки электроэнергии, предназначенных для работы на Крайнем Севере.

**Предметом исследования** стали перспективы развития ветро- и гелиоэнергетики в Магаданской области с точки зрения теории надежности.

**Целью работы** является оценка надежности гибридных систем выработки электроэнергии, предназначенных для работы на Крайнем Севере.

**Личный вклад:** выносимые на защиту результаты получены соискателем лично.

**Публикации:** по основным результатам опубликовано 3 печатные работы.

**Ключевые слова:** автономные системы генерации, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, фотоэлектрический преобразователь, аккумуляторная батарея, надежность автономных систем генерации, децентрализованные зоны электроснабжения, Магаданская область, потенциал энергии ветра, потенциал солнечной энергии, гидропотенциал рек, географические информационные системы, кластерный анализ.

В магистерскую диссертацию входят: введение, 5 глав и заключение.

Во введении раскрывается актуальность исследования по выбранному направлению.

Первая глава отражает общие сведения о возобновляемых источниках энергии, основные показатели надежности оборудования автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии.

Во второй главе рассмотрены основные причины отказов оборудования систем генерации на основе возобновляемых источников энергии.

Третья глава посвящена сравнению методов оценки надежности автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии.

В четвертой главе исследуется роль возобновляемых источников энергии. Так же проводится анализ потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области.

В пятой главе описывается процесс моделирования данных потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области на базе географических информационных систем. Для проведения процедуры кластеризации используется программный комплекс STATISTICA.

В заключении обзревается основные выводы и предложения, полученные в ходе выполнения работы.

## АВТОРЕФЕРАТ

С внедрением возобновляемых источников энергии, в частности ветроэнергетических и фотоэлектрических установок, в автономных системах генерации проблема надежности используемого оборудования и всего энергетического комплекса становится одной из главных. Необходима разработка и совершенствование методов анализа и расчета надежности, которые на стадии проектирования позволят учитывать вероятностные характеристики возобновляемых источников энергии, показатели надежности и опыт эксплуатации используемого оборудования. А также рассчитать надежность установок, провести сравнительный анализ надежности вариантов схем автономных систем генерации на базе возобновляемых источников энергии и обосновать выбор оптимального варианта. Исходя из современных требований к проектной документации, расчет надежности является частью обязательных работ на стадии проектирования электроустановок.

Моделирование и оценка надежности автономных систем генерации, использующих ветровую и/или солнечную энергию, является новым направлением в оценке надежности изолированных энергосистем. Функционирование возобновляемых источников энергии существенно отличается от традиционного энергоблока и во многом зависит от местных энергетических ресурсов (ветра, солнечной радиации), которые носят переменный характер. Возобновляемые источники энергии могут нести убытки от незапланированных отключений, как из-за отказа самого оборудования, так и из-за природных энергетических ресурсов (отсутствие солнечной радиации для фотоэлектрических установок, недостаточная скорость ветра или штормовой ветер для ветроэнергетических установок). Природные энергетические ресурсы являются нестабильными и переменными источниками энергии, которые зависят от времени суток, времени года и географического расположения исследуемой территории. Они характеризуются частичной непредсказуемостью и значительной изменчивостью.

В связи с этим представляется целесообразным усовершенствовать методы оценки надежности энергетических комплексов, содержащих ветроэнергетические и/или фотоэлектрические, дизель-генераторные установки и устройства накопления энергии. Учет надежности позволяет нам оценивать влияние аварийных отказов и состава оборудования на количество электроэнергии, вырабатываемой автономными системами генерации, а также определять технико-экономические показатели с учетом надежности.

## ABSTRACT

With the introduction of renewable energy sources, in particular wind power and photovoltaic installations, in autonomous generation systems, the problem of the reliability of the equipment used and the entire energy complex becomes one of the main ones. Development and improvement of methods of analysis and calculation of reliability is required, which will allow at the design stage to take into account the probabilistic characteristics of renewable energy resources, reliability indicators and operating experience of the equipment used. Also, to calculate the reliability of plants, perform a comparative analysis of the reliability of options for schemes of autonomous generation systems based on renewable energy sources and justify the choice of the best option. Based on current requirements for project documentation, the calculation of reliability is part of the mandatory work at the design stage of electrical installations.

Modeling and assessing the reliability of autonomous generation systems using wind or solar energy is a new area in assessing the reliability of isolated power systems. The functioning of renewable energy sources differs significantly from the traditional generating unit and largely depends on local energy resources (wind, solar radiation), which are variable in nature. Renewable energy sources can suffer unplanned outages, both due to a failure of the equipment itself and due to natural energy resources (lack of solar radiation for photovoltaic plants, insufficient wind speed or gale for wind power plants). Natural energy resources are unstable and variable sources of energy, which depend on the time of day, season and geographical location of the studied area. They are characterized by partial unpredictability and considerable variability.

In this regard, it seems relevant to improve the methods for assessing the reliability of energy complexes containing wind power or photovoltaic, diesel generator sets and energy storage devices. Reliability accounting allows us to assess the impact of emergency failures and equipment composition on the amount of electricity generated by autonomous generation systems, as well as to determine technical and economic indicators taking into account reliability.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	9
1 Основные понятия и методы оценки надежности систем генерации с использованием возобновляемых источников энергии .....	10
1.1 Общая характеристика проблемы надежности электроснабжения в децентрализованных населенных пунктах .....	10
1.2 Ветровая и солнечная энергия в автономных системах генерации .....	13
1.3 Показатели надежности оборудования автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии .....	17
2 Анализ причин отказов и данные о показателях надежности оборудования систем генерации на основе возобновляемых источников энергии .....	22
2.1 Причины отказов ветроэнергетических установок .....	22
2.2 Причины отказов фотоэлектрических преобразователей .....	24
2.3 Причины отказов аккумуляторных батарей .....	26
2.4 Причины отказов инвертора .....	28
2.5 Причины отказов низковольтных автоматических выключателей .....	28
3 Сравнительный анализ методов оценки надежности автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии .....	30
4 Роль возобновляемых энергоресурсов в обеспечении энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения.....	34
4.1 Задачи интеграции возобновляемых источников энергии в энергобаланс децентрализованных зон электроснабжения .....	34
4.2 Анализ потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области .....	37
4.2.1 Потенциал энергии ветра Магаданской области .....	37
4.2.2 Потенциал солнечной энергии Магаданской области .....	40

4.2.3 Гидропотенциал рек Магаданской области .....	42
5 Моделирование данных потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области .....	46
5.1 Эффективность применения информационной базы возобновляемых источников энергии в районах Магаданской области.....	46
5.2 Классификация исходных параметров возобновляемых источников энергии в кластерном анализе .....	47
Заключение .....	58
Список использованных источников .....	59



## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, существует два основных типа систем, использующих возобновляемую энергию: автономные и сетевые.

Автономные эксплуатируются на объектах, которые не имеют возможности подключения к государственной сети.

Сетевые электростанции имеют возможность генерировать электроэнергию в сети общего пользования.

Согласно Энергетической стратегии России, на период до 2030 года [1] одним из приоритетов является развитие автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии.

Многие авторы занимались разработкой математических моделей и методов оценки надежности автономных систем генерации на основе энергии ветра и/или солнца. Большая часть их работ сосредоточена на оценке надежности систем генерации, основанных только на энергии ветра или солнца, гораздо меньше посвящено оценке надежности систем генерации, содержащих традиционные источники энергии, такие как дизельные генераторы, а также устройства накопления энергии (аккумуляторные батареи), работающие совокупно с возобновляемыми источниками энергии.

## **1 Основные понятия и методы оценки надежности систем генерации с использованием возобновляемых источников энергии**

С мая 2016 года каждый гражданин Российской Федерации имеет право на бесплатное получение земельного участка площадью до одного гектара в пределах территории Дальневосточного Федерального округа. Этот округ включает не только Дальний Восток в привычном нам всем понимании, но и ряд других субъектов, всего их насчитывается 11, а именно – Приморский, Камчатский и Хабаровский Края, Амурскую, Сахалинскую и Магаданскую области, Еврейскую автономную область, Чукотский автономный округ. Вот это привычный для нас всех Дальний Восток. Но в состав Федерального округа входят и Республика Саха, Республика Бурятия, а также Забайкальский край. Площадь этого региона почти 7 миллионов квадратных километров, а население всего – 8 миллионов человек. То есть на одного человека приходится чуть меньше одного квадратного километра, а раздать предполагается только сотую часть. Для этого создана программа «Дальневосточный Гектар».

Идея Дальневосточного Гектара – повторить Столыпинскую реформу и с минимальным вложением средств со стороны государства увеличить население Дальнего Востока. Получение Дальневосточного гектара может помочь с энергоснабжением территорий Дальневосточного федерального округа.

### **1.1 Общая характеристика проблемы надежности электроснабжения в децентрализованных населенных пунктах**

По данным Минэнерго РФ, зоны децентрализованного электроснабжения, не имеющие современных электрических сетей и крупных источников энергии, занимают около 70% территории государства [2]. Большинство изолированных и малонаселенных поселений, рассеянных по огромной территории, расположены в суровых климатических зонах – Сибири, Дальнем Востоке и Крайнем Севере. Энергоснабжение этих регионов осуществляется в основном

дизельными электростанциями (ДЭС), работающими на дорогом импортном топливе.

По данным [3], количество ДЭС, работающих в зоне децентрализованного энергоснабжения, составляет около 900 с общей выработкой электроэнергии около 2,54 млрд кВт·ч в год. Сегодня многие ДЭС имеют физически и морально изношенное оборудование.

Автономные дизельные электростанции, как правило, проходят периодическое техническое обслуживание и ремонт с целью поддержания их эксплуатационного состояния. Однако обобщение практического опыта эксплуатации ДЭС [4] показывает, что в изолированных районах этот источник питания является ненадежным. Статистика отказов позволяет выделить их основные виды и причины отказов, характерные для условий децентрализованных территорий [5]. Виды и причины отказов ДЭС в автономных системах генерации представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Виды и причины отказов дизельных электростанций в автономных системах генерации

Виды отказов	Возможные причины
Отказы механических частей двигателя	выход из строя топливной аппаратуры
	загрязнение, отсыревание деталей, контактов
	применение деталей других марок
Отказы по вине персонала	неопытность
	незнание оборудования
	дефицит кадров
	несвоевременный осмотр оборудования
Отказ механической аппаратуры	некачественное топливо
	подсос воздуха в топливной системе

## Окончание таблицы 1.1

Виды отказов	Возможные причины
Физический износ оборудования	старение изоляции
	большая нагрузка на электрооборудование из-за продолжительного графика работы
	износ элементов из-за низких температур
	вытекание смазки
	неисправность отопления/системы охлаждения

Следует отметить, что в первую очередь все причины отказов автономных дизельных электростанций – это отказы, вызванные большой нагрузкой на электрооборудование из-за длительного графика работы. Длительность работы ДГ в режимах, близких к максимальным нагрузкам, ускоряет процесс износа оборудования. Авторы ряда работ [6,7] выделяют не менее важную проблему надежного электроснабжения в отдаленных районах – зависимость электроснабжения от поставок топлива. Проблемы и трудности в поставках дизельного топлива связаны с такими особенностями как:

- сезонность завоза топлива;
- территориальная удаленность от поставщиков топлива;
- отсутствие рынка автотранспортных услуг;
- разбросанность и удаленность ДЭС друг от друга.

Все перечисленные выше факторы влияют на стоимость электрической энергии.

Из-за нехватки и дороговизны топлива во многих регионах круглосуточное энергоснабжение от ДЭС не обеспечивается. Опыт показывает, что продолжительность подачи питания от ДЭС обычно составляет не более 6-8 часов в сутки.

Таким образом, проблема надежного электроснабжения является одной из ключевых для децентрализованных потребителей, рассредоточенных по России.

Надежное электроснабжение является важнейшим компонентом жизнеобеспечения современного человека.

В соответствии федеральным законом №261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» и с распоряжением Правительства РФ №1-р от 08.01.09 «Об использовании возобновляемых источников энергии» за счет создания АСГ с использованием возобновляемых источников энергии можно повысить эффективность генерации, снизить себестоимость электроэнергии и снизить частоту отказов оборудования ДЭС. Наиболее широко используются возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и фотоэлектрические установки.

## **1.2 Ветровая и солнечная энергия в автономных системах генерации**

Автономные системы генерации, основанные только на ветровой или солнечной энергии, не могут обеспечить непрерывное электроснабжение изолированных потребителей. Функционирование возобновляемых источников энергии характеризуется нестабильностью производства электрической энергии. Режимы работы ветрогенератора зависят от скорости ветра, которая является случайной величиной в пространстве и времени. Энергетические характеристики ветра представлены вероятностным описанием случайного процесса изменения энергетического потенциала ветра. Были предложены различные типы функций распределения скоростей ветра [8]. В работе для определения ветроэнергетических ресурсов в конкретном местоположении принято распределение Вейбулла, так как выявлено, что оно дает наибольшую точность в диапазоне скоростей от 4 до 20 м/с.

Данные о скорости ветра аппроксимируют стандартной функцией распределения:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad (1.1)$$

где  $c$  – параметр масштаба, физически конкретное значение данного параметра может быть связано с выбором шкалы измерения;

$k$  – параметр формы, однозначно определяющий коэффициент вариации, его можно графически оценить, подбирая значение параметра, которое соответствует наилучшей линейности графика;

$v$  – скорость ветра;

$F(v)$  – функция интегральной повторяемости скорости ветра, она показывает долю времени (вероятность) того, что скорость ветра равна или ниже, чем  $v$ .

Плотность распределения:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}. \quad (1.2)$$

Вероятность повторения ветра в любом интервале скоростей:

$$P(v_1 < v < v_2) = F(v_2) - F(v_1) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k}. \quad (1.3)$$

Годовая ожидаемая выработка электроэнергии ВЭУ:

$$W_{\text{ВЭУ}}^{\text{ОЖ}} = T \cdot \sum_{i=1}^m p_i(v) \cdot N_i(v), \quad (1.4)$$

где  $T$  – число часов работы ВЭУ за год;

$m$  – количество градаций скоростей ветра;

$p_i(v)$  – повторяемость скорости по градациям;

$N_i(v)$  – выходная мощность при данной скорости ветра, определяемая по рабочей характеристике ВЭУ.

Средняя мощность ВЭУ:

$$P_{\text{ср.ВЭУ}} = 4,81 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 \cdot v_p^3 \cdot \xi \cdot \eta_p \cdot \eta_g, \quad (1.5)$$

где  $D$  – диаметр ветроколеса, м;

$v_p$  – расчетная скорость ветра, м/с;

$\xi$  – коэффициент использования ветрового потока;

$\eta_p$  и  $\eta_g$  – КПД редуктора и генератора соответственно.

Режимы работы ФЭП являются высокоинтенсивными, постоянно меняющимися во времени.

В данной работе основой для прогнозирования производства солнечной энергии являются данные о среднесуточном удельном значении поступающей солнечной радиации в месяц. Такой подход устраняет необходимость в почасовых солнечных данных. Наиболее полной является база данных NASA [9], полученная на основе данных со спутников.

Годовая ожидаемая выработка электроэнергии ФЭП:

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ОЖ}} = \sum_{i=1}^k E_i \cdot \eta_{\text{ФЭП}} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot S_{\text{ФЭП}} \cdot n_{\text{ФЭП}} \cdot (T_{\text{pdi}} - T_{\text{pbsi}}), \quad (1.6)$$

где  $E_i$  – усредненное для  $i$ -го месяца суточное удельное значение падающей радиации на ориентированную поверхность;

$\eta_{\text{ФЭП}}$  – КПД фотоэлектрического преобразователя;

$\eta_{\text{и}}$  – эффективность преобразования инвертора;

$S_{\text{ФЭП}}$  – площадь незатененной части фотоэлектрического преобразователя;

$n_{\text{ФЭП}}$  – количество ФЭП;

$T_{\text{pdi}}$  – количество дней в рассматриваемом  $i$ -м месяце;

$T_{pbsi}$  – количество бессолнечных дней в  $i$ -м месяце.

Средняя мощность, вырабатываемая ФЭП, за рассматриваемый период:

$$P_{\text{ср.ФЭП}} = E \cdot \eta_{\text{ФЭП}} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot S_{\text{ФЭП}} \cdot n_{\text{ФЭП}} \cdot \frac{T_{pd} - T_{pbs}}{T_{pd}}. \quad (1.7)$$

Для поддержания постоянного электроснабжения потребителей от генераторов возобновляемой энергии они должны использоваться совместно с гарантированными источниками питания: газогенераторами и/или накопителями электрической энергии (АБ). Также перспективно и совместное использование различных видов возобновляемой энергии.

Существуют работы [10-17] посвященные вопросам создания энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии, в частности ветрогенераторов и/или солнечных батарей. Обобщая результаты научных исследований, можно выделить несколько основных конфигурационных вариантов построения автономных генераторных систем с использованием ветрогенераторов и/или солнечных элементов, ДГ и АБ:

- ветроэнергетическая установка, работающая совместно с дизельным генератором (ВЭУ+ДГ);
- фотоэлектрический преобразователь, работающий совместно с дизельным генератором и аккумуляторной батареей (ФЭП+ДГ+АБ);
- ветроэнергетическая установка, работающая совместно с дизельным генератором и системой аккумулирования энергии (ВЭУ+ДГ+АБ);
- совместная работа ветроэнергетической установки, фотоэлектрического преобразователя, дизельного генератора и аккумуляторной батареи (ВЭУ+ФЭП+ДГ+АБ);
- совместная работа ветроэнергетической установки, фотоэлектрического преобразователя и дизельного генератора (ВЭУ+ФЭП+ДГ).



Состав оборудования автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии в конкретном месте зависит от наличия того или иного вида местных энергоресурсов.

Применение ветродизельных энергоустановок перспективно для районов с высоким и средним ветроэнергетическим потенциалом. В Магаданской области для использования ветроэнергетических ресурсов наиболее благоприятной является территория Востока, а также мысы и острова южного побережья региона. Среднемесячная скорость ветра в этих районах зимой составляет 7-15 м/с, количество дней с сильными ветрами (более 18 м/с) – от 60 до 110 [18].

Использование солнечно-дизельных установок перспективно в районах с высоким и средним солнечным потенциалом. Магаданская область относится к зоне со средним солнечным потенциалом. По данным [19, 20], продолжительность солнечного сияния Магаданской области составляет от 1700 до 2000 часов в год.

### **1.3 Показатели надежности оборудования автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии**

Надежность понимается как свойство объекта выполнять определенные функции в заданном объеме при определенных условиях эксплуатации. Общими заданными функциями применительно к системам генерации являются обеспечение потребителей в необходимом количестве вырабатываемой электроэнергией требуемого качества [21].

Оборудование электростанций со временем выходит из строя. Отказ понимается как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [22]. В большинстве случаев разрушенные элементы установки восстанавливаются. Включение в работу резервных элементов позволяет восстанавливать оборудование без прерывания работы установки. Процесс восстановления и профилактики оборудования не полностью исключает возможность отказов установок, но значительно снижает вероятность

их выхода из строя, что повышает надежность. Любой объект и его свойства могут быть описаны различными системами показателей надежности. Выбор системы показателей – это задача, решение которой существенно зависит от характера объекта, его назначения, общих требований к процессу и результатам его функционирования, критериев, используемых для его экономической эффективности. В работе основными показателями, характеризующими надежную работу оборудования АСГ на основе возобновляемых источников энергии, являются интенсивность отказов  $\lambda(t)$ , 1/год, среднее время восстановления  $\tau_{cp}$ , ч, скорость восстановления  $\mu$ , 1/год. Интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа для данного момента времени, при условии, что до этого момента отказ не произошел. Физический смысл плотности вероятности отказа – это число отказов элементов за любой достаточно малый промежуток времени [21].

На рисунке 1.1 показана кривая зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации, типичная для многих элементов электронного и электротехнического оборудования.

На рисунке показано, что весь временной интервал можно разделить на три части. В первом из них (период приработки) функция  $\lambda(t)$  имеет повышенное значение, это связано с отказом оборудования вскоре после начала работ, вызванным скрытыми дефектами в производстве. Второй период (период нормальной эксплуатации) характеризуется постоянным значением интенсивности отказов. Последний период – это период старения.

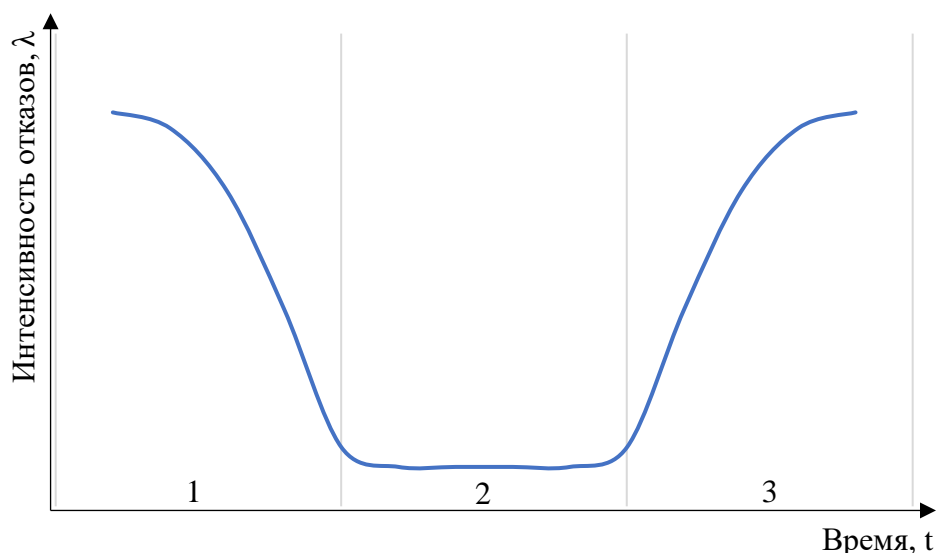


Рисунок 1.1 – Зависимость интенсивности отказов от времени восстановления

В работе принимается  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ , так как большинство элементов в автономных системах генерации, основанных на возобновляемых источниках энергии, имеют длительный период, в течение которого интенсивность отказов практически постоянна. Периодом приработки можно пренебречь, учитывая, что нормальная работа начинается после окончания этого периода.

Среднее время восстановления – это время вынужденного простоя, необходимое для обнаружения и устранения одного сбоя. Время восстановления ветрогенератора или фотопреобразователя зависит от многих факторов, основными из которых являются характер неисправности, наличие технической диагностики, степень квалификации обслуживающего и ремонтного персонала. Среднее время восстановления обратно пропорционально интенсивности восстановления:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{\mu}. \quad (1.8)$$

Статистика отказов может быть получена либо в результате наблюдений за изделиями в ходе нормальной или опытной эксплуатации, либо в результате стендовых испытаний. Комплексными показателями, характеризующими

надежность функционирования автономных систем генерации на базе возобновляемых источников энергии в процессе работы, являются коэффициент вынужденного (аварийного) простоя ( $q_{\text{п}}$ ) и коэффициент готовности ( $K_{\text{г}}$ ).

Коэффициентом вынужденного простоя является вероятность того, что система (элемент) выйдет из строя в произвольно выбранное время в интервалах между плановыми ремонтами. В качестве времени простоя рассматривается время, необходимое для обнаружения и устранения отказов и ввода системы в эксплуатацию, а также время простоя из-за отсутствия запасных частей и время проведения работ профилактических работ. При этом не учитываются простои при плановом ремонте и техническом обслуживании.

Если  $i$ -й элемент является невосстанавливаемым, то справедливо равенство:

$$q_{\text{п}i}(t) = 1 - \exp(-\lambda_i \cdot t) = \lambda_i \cdot t, \quad (1.9)$$

где  $t$  – расчетное время.

Для восстанавливаемого элемента:

$$q_{\text{п}i}(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \cdot [1 - \exp(-(\lambda_i + \mu_i) \cdot t)], \quad (1.10)$$

где  $\mu_i$  – интенсивность восстановления элемента системы, 1/год.

При  $t \rightarrow \infty$  и при  $\lambda_i / \mu_i \ll 1$  получается:

$$q_{\text{п}i}(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \approx \frac{\lambda_i}{\mu_i}, \quad (1.11)$$

или

$$q_{\text{п}i}(t) \approx \lambda_i \cdot \tau_i, \quad (1.12)$$

Коэффициент готовности  $i$ -го элемента, представляющий собой вероятность того, что объект будет эксплуатироваться в произвольный момент времени в интервалах между плановыми ремонтами, определяется по формуле:

$$K_{Гi} = 1 - q_{\Pi i}. \quad (1.13)$$

## **2 Анализ причин отказов и данные о показателях надежности оборудования систем генерации на основе возобновляемых источников энергии**

Сбои в работе системы на основе возобновляемых источников энергии неизбежны даже при наличии качественного оборудования и высокого уровня эксплуатации. Они возникают по ряду объективных причин случайного характера. Оборудование автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии находится под влиянием многих факторов, которые существенно влияют на надежную работу системы. Знание причин отказов оборудования необходимо для построения системы профилактических мероприятий, мониторинга, испытаний, диагностики, планово-предупредительных и капитальных ремонтов, обеспечивающих высокий уровень надежности.

### **2.1 Причины отказов ветроэнергетических установок**

К выходу из строя ветроэнергетической установки может привести к повреждению конструкции любого из компонентов установки. Это может быть разрушение в бетонном основании, выход из строя самих лопастей, сдвиги болтов, изгиб подвесок и другие неполадки [23].

Согласно исследованиям, наиболее распространенными причинами отказов ветроэнергетических установок являются неисправности электрической системы, системы управления и датчиков. Самый дорогой тип отказа ветряных турбин – это повреждение лопастей, поскольку они являются основным компонентом ветроэнергетической установки, а стоимость и продолжительность их ремонта довольно высоки. Стоимость лопастей ветроэнергетической установки может составлять 15-20% от общей стоимости электростанции. Другими важными компонентами ветроэнергетической установки являются

редукторы, подшипники промежуточного вала и высокоскоростные опорные подшипники.

Возможные причины повреждений компонентов ВЭУ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Причины повреждений компонентов ветроэнергетических установок

Узел/компонент ветроэнергетической установки	Возможные причины повреждения
Лопasti ротора	повреждения поверхности, трещины, повреждения системы молниезащиты
Привод	коррозия
Гондола	коррозия, трещины
Гидравлическая система, пневматическая система	утечка, коррозия
Башня и фундамент	коррозия, трещины
Предохранительные устройства, датчики и тормозные системы	повреждения, износ
Электрическая система, система управления	коррозия, грязь

Получение статистики по отказам ветроэнергетических установок представляет определенную трудность. Это связано с тем, что большинство производителей запрещают открыто публиковать такие данные, и для некоторых компонентов такая информация недоступна, поскольку они были разработаны и введены в эксплуатацию несколько лет назад и не отработали срок их службы. Однако некоторые производители приводят показатели надежности своих ветроэнергетических установок [24]. В таблице 2.2 приведены показатели надежности компонентов ВЭУ различной мощности.

Таблица 2.2 – Показатели надежности компонентов ветроэнергетических установок различных мощностей

Компонент ветроэнергетической установки		Интенсивность отказов $\lambda$ , 1/год			$\tau$ , ч
		300 кВт	600 кВт	1000 кВт	
Отказы электрооборудования	генератор	0,04	0,075	0,13	28
	электроника	0,24	0,27	0,31	16
Отказы средств управления	механический тормоз	0,01	0,03	0,03	3
	гидравлика	0,04	0,26	-	9
	поворотный механизм	0,06	0,13	0,48	10
	датчики	0,02	0,07	0,28	-
Привод	лопасти	0,04	0,18	0,16	28
	коробка передач	0,09	0,17	-	55
	вал/подшипники	0,008	0,01	0,06	5
Другие		1,1	0,21	0,25	33

## 2.2 Причины отказов фотоэлектрических преобразователей

Технические неисправности фотоэлектрических преобразователей также могут быть вызваны разного рода причинами, к ним относятся: нарушение герметизации, коррозия, разрушение верхнего стекла ФЭП, повреждение стыков и пайки, растрескивание ячеек, пыль/грязь/снег.

В таблице 2.3 приведены основные виды отказов ФЭП, и причины их появления.



Таблица 2.3 – Отказы фотоэлектрических преобразователей и причины их появления

Вид отказа	Возможные причины
Нарушение герметизации	обесцвечивание, расслоение, попадание влаги
Разрушение верхнего стекла	тепловой стресс, ветер или град
Повреждения соединений и пайки	электрические перегрузки, высокое напряжение, высокая температура нагрева ячеек
Коррозия	влажность
Растрескивание ячеек	усталостные явления, брак при изготовлении ячеек, высокие температурные напряжения, вандализм, механические нагрузки из-за ветра (давление и вибрация), град, ошибки при монтаже, обслуживание, транспортировка, установка и хранение
Диэлектрический пробой	превышение температуры
Отслаивание (расслоение) составных элементов модуля	трещины, физическое перемещение ячеек в штампованной алюминиевой подложке, слабая адгезия металлизации ячеек; расширение изгибающих напряжений, вызванных неравномерным расширением и сжатием захваченной влаги и воздуха
Пыль	плотность пыли

В зависимости от типа фотоэлектрических преобразователей влияние причин сбоев может быть разным. Таким образом, наиболее распространенными причинами выхода из строя фотоэлектрических элементов из кристаллического кремния являются высокая влажность, приводящая к коррозии оборудования (около 30%), тепловой стресс (16%), а также сочетание холода и влажности (14%). В свою очередь, отказы тонкопленочных солнечных элементов вызваны высокой влажностью (66%) и избыточной температурой (20%).

В таблице 2.4 приведены обобщенные данные интенсивности отказов ФЭП различных типов. Интенсивность отказов определена как для отдельных ФЭП, так и их массивов.

Таблица 2.4 – Интенсивность отказов фотоэлектрических преобразователей различных типов

Тип фотоэлектрических преобразователей	Состав	Интенсивность отказов, 1/год
Аморфные кремниевые (a-Si)	модуль	0,0087
	массив	0,0095
Монокристаллические кремниевые (mono-Si)	модуль	0,0036
	массив	0,0023
Поликристаллические кремниевые (multi-Si)	модуль	0,0064
	массив	0,0059
На основе Теллурида Кадмия (CdTe)	модуль	0,004
	массив	0,003
Из Селенида Меди-Индия-Галлия (CIGS)	модуль	0,0096
	массив	0,0002

### 2.3 Причины отказов аккумуляторных батарей

Свинцово-кислотные батареи наиболее широко используются в автономных системах генерации на основе возобновляемых источников энергии из-за их низкой стоимости, приемлемого срока службы, простоты обслуживания и высоких энергетических характеристик [25].

Характерные отказы свинцово-кислотных АБ и причины их появления, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Отказы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей и причины их появления

Вид отказа	Возможные причины
Сульфатация электродов	недостаточность первого заряда
	систематические недозаряды
	чрезмерно глубокие разряды
	длительное время батарея оставалась разряженной
	неполное покрытие электродов электролитом
Короткое замыкание	коробление положительных электродов
	повреждение или дефект сепараторов
	замыкание наростами губчатого свинца
Коробление положительных электродов	чрезмерно большое значение зарядного тока при приведении в действие батареи
	сильная сульфатация пластин
	короткое замыкание данного электрода с соседним отрицательным
Коробление отрицательных электродов	повторные перемены направления заряда при изменении полярности электрода
	воздействие со стороны соседнего положительного электрода
Усадка отрицательных электродов	большие значения зарядного тока или чрезмерный перезаряд при непрерывном газообразовании
	недоброкачественные электроды
Изменение размеров положительных электродов	разряды до конечных напряжений ниже допустимых значений
	загрязнение электролита
Разъедание нижней части положительных электродов	систематическое недоведение заряда до конца, в результате чего после доливок электролит плохо перемешивается и происходит его расслоение
На дне баков значительный слой шлама темного цвета	систематические излишние заряды и перезаряды
Саморазряд и газовыделение. Выделение газа из аккумуляторов	загрязнение электролита соединениями металлов меди, железа, мышьяка, висмута

Определение отказов и их причин производится по результатам испытаний и измерений, а также по результатам внешних проверок аккумуляторных батарей.

## **2.4 Причины отказов инвертора**

Инвертор является одним из наиболее уязвимых компонентов автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии. Опыт эксплуатации показывает, что отказ инвертора является основной причиной отказов в автономных системах генерации на основе возобновляемых источников энергии. Наиболее важными причинами отказов инвертора являются: дефекты при изготовлении устройства или ошибка на этапе проектирования; неправильная эксплуатация; выход из строя электрических компонентов; грозовой шторм.

## **2.5 Причины отказов низковольтных автоматических выключателей**

Повреждение коммутационных устройств происходит в стационарном состоянии и при выполнении ими операций: отключение коротких замыканий, нагрузок, оперативные переключения и т. д. Основными причинами повреждения коммутационных устройств являются: выход из строя приводов; механическое повреждение; обгорание контактов; износ дугогасительных устройств. Скорость износа контактов при переключении определяет уровень надежности работы устройств.

В таблице 2.6 представлены вероятностные показатели надежности вспомогательного и резервного оборудования АСГ на основе ВИЭ.

Таблица 2.6 – Показатели надежности оборудования автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии

Компоненты автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии	Значения показателей надежности	
	$\lambda$ , 1/год	$\tau$ , год
Рабочий дизельный генератор	0,025	0,015
Резервный дизельный генератор	0,0025	0,015
Аккумуляторная батарея	0,003	0,0015
Инвертор	0,113	0,083
Выпрямитель	0,015	0,0003
Конвертор	0,0009	0,0003
Автоматический выключатель 0,4 кВ	0,0015	0,0003
Кабельная линия 0,4 кВ	0,007	0,0015
Сборные шины 0,4 кВ	0,003	0,0015

### **3 Сравнительный анализ методов оценки надежности автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии**

Анализ надежности АСГ на основе возобновляемых источников энергии является сложной практической задачей, решению которой посвящено небольшое количество работ [26-29]. Представленные математические модели в этих работах были реализованы с использованием различных методов: аналитический метод, метод пространства состояний (теория Марковских процессов), моделирование по методу Монте-Карло, метод дерева отказов, метод перечисления состояний.

Большая часть работ сосредоточено на оценке надежности генерирующих систем, основанных только на ветровой или солнечной энергии, гораздо меньше работ посвящено оценке надежности систем, содержащих возобновляемые источники энергии и работающих в совокупности с традиционными источниками энергии.

Широко распространены аналитические методы. Аналитический метод дает информацию о вероятности неспособности генерирующих объектов покрыть прогнозируемую нагрузку. В большинстве аналитических методов модель генерации обычно представлена в виде таблицы мощностей и связанных с ними вероятностей их отключения. Модель нагрузки представлена кривой суточной максимальной нагрузки или кривой постоянной нагрузки. Этот же метод позже был распространен на автономную энергетическую систему, основанную на солнечных батареях.

Детальный учет влияния стохастической природы энергоресурсов на надежную работу автономных систем генерации на основе возобновляемых источников энергии проводится с использованием метода Монте-Карло. Метод включает в себя моделирование данных о природных энергетических ресурсах (скорости ветра, солнечной радиации) ежечасно для различных локаций с использованием моделей временных рядов, которые создаются с

использованием архивных данных, собранных за несколько лет. Ежечасные данные о природных энергоресурсах позволяют определить выходную мощность ветрогенераторов и/или солнечных батарей. Метод также включает в себя моделирование состояния аккумуляторной батареи из временного ряда генерации и нагрузки анализируемой системы. Сложность применения метода Монте-Карло заключается в том, что требуются точные и детальные данные о скорости ветра или солнечной радиации для конкретного местоположения. Для многих регионов метеорологические данные либо отсутствуют, либо имеются в сжатом виде.

Так же для анализа надежности ВИЭ в автономных системах генерации используется метод пространства состояний (Марковские процессы). Все возможные переходы в такой системе описываются Марковским графом состояний. В методе используется модель многократных переходов из одного состояния в другое, учитывающая изменение солнечной радиации, а также эксплуатационные состояния элементов системы (рабочее, пониженное, отказное состояние). Вероятность выхода из строя солнечных элементов из-за отсутствия солнечной радиации учитывается путем объединения модели выходной мощности солнечных элементов и модели функции распределения вероятностей солнечной радиации. Главным преимуществом метода пространства состояний является четкая картина всех состояний системы и переходов между ними. Оценка показателей надежности технических систем с использованием цепей Маркова позволяет учитывать множество факторов (частичные отказы, плановые и аварийные ремонты, отказы по общим причинам, зависимые отказы, погодные условия, последовательность отказов), влияющих на работу системы. Однако этот метод имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение: отсутствие исходных данных (интенсивность перехода между состояниями, вероятность состояний и продолжительность пребывания в каждом состоянии); высокая размерность математической модели при анализе надежности систем с большим числом элементов.

Наименее распространенными методами оценки надежности автономных систем генерации на основе ВИЭ являются такие методы, как метод дерева отказов и метод перечисления состояний.

Метод дерева отказов используется для оценки надежности автономной системы электропитания, основанной на фотоэлектрических элементах и батареях, при этом учитываются отказы системы управления и инвертора. Метод является мощным инструментом для оценки надежности реальных технических систем, поскольку он помогает прогнозировать потенциальные сбои и повышает надежность системы на этапе проектирования. Это позволяет визуально представить причинно-следственные связи между сбоями и определить наиболее важные сбои и недостатки в системе. Однако метод дерева отказов требует значительных усилий при построении дерева отказов. Этот фактор способствовал его небольшому развитию для использования при оценке надежности автономных систем энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Метод перечисления состояний используется для количественной оценки показателей надежности автономной системы электроснабжения на основе солнечных элементов. Метод учитывает влияние частоты отказов компонентов системы на выходную мощность, уровень напряжения и потери мощности. Каждый компонент фотоэлектрической системы имеет два взаимоисключающих состояния: рабочее состояние и состояние ожидания. Метод перечисления состояний позволяет учитывать изменение интенсивности солнечного излучения, но подходит только для систем с элементами одного типа (система фотопреобразователей без источников других типов и АБ).

Несмотря на большое разнообразие методов анализа надежности автономных систем генерации с использованием возобновляемых источников энергии, некоторые проблемы не были решены или требуют более тщательного изучения. В частности, не в полной мере учитываются следующие факторы: влияние погодных условий на надежную работу генерирующих систем; аварийные отказы генерирующего (ВЭУ, ФЭП, ДГ, АБ) и дополнительного



оборудования (инвертор, преобразователь, кабельные линии, шины), резервного оборудования и коммутационных аппаратов. Это обуславливает необходимость и определяет актуальность исследований по разработке научно обоснованных моделей и методов анализа надежности автономных систем генерации на основе ВИЭ.

## **4 Роль возобновляемых энергоресурсов в обеспечении энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения**

Большинство энергетических лидеров признают, что возобновляемые источники энергии и децентрализованные системы будут играть одну из основных ролей в устойчивом развитии современной энергетики.

### **4.1 Задачи интеграции возобновляемых источников энергии в энергобаланс децентрализованных зон электроснабжения**

Дополнительные меры по обеспечению энергетической безопасности с использованием возобновляемых источников энергии и традиционных энергетических ресурсов основаны на достижении наиболее экономического решения, технологического совершенства, социального эффекта, целей экологической политики и т. д.

На сегодняшний день уже накоплено достаточно данных и знаний относительно опыта функционирования энергетики с использованием возобновляемых источников энергии. Несмотря на это, вопросы интеграции возобновляемых источников энергии сопровождаются необходимостью решения отдельных проблем и задач, возникающих исключительно на децентрализованных территориях. Интеграция даже изменчивой генерации на основе возобновляемых источников энергии в энергетическом секторе, с экономической точки зрения, может составить конкуренцию традиционной децентрализованной энергетике, основанной на ископаемом импортном топливе.

Интеграция возобновляемых источников энергии в энергетический баланс децентрализованных зон должна оцениваться в виде общей эффективности от повышения надежности генерирующего объекта, минимизации выбросов вредных веществ, создания новых рабочих мест в секторе возобновляемой

энергетики и других выгод. То есть определить набор эффектов при постановке задачи интеграции.

Таким образом, можно говорить об интегральном значении возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетической безопасности децентрализованных территорий, которое будет характеризоваться сочетанием положительных эффектов (повышение надежности, снижение потерь энергии, снижение затрат топлива и др.) и сопутствующих факторов с дополнительными затратами (необходимость внедрения современных технологий обеспечения стабильности генерации с переменным характером проявления потенциала возобновляемой энергетики, совершенствование функционирования гибридного комплекса, прогнозирование генерации на основе возобновляемых источников энергии, высокие затраты на сетевую инфраструктуру, замена низкоэффективного электрооборудования и установок и др.).

Для любого генерирующего объекта интеграция в энергетический баланс сопровождается ориентацией на решение присущих этому процессу задач. Поэтому интеграция возобновляемых источников энергии требует системного подхода к осуществлению ряда преобразований, которые должны охватывать все направления реализации условий обеспечения энергетической безопасности [30].

Автономные системы электроснабжения должны быть адаптированы и модернизированы для интеграции с переменными возобновляемыми источниками энергии. Задачи интеграции возобновляемых источников энергии в энергетический баланс зон децентрализованного энергоснабжения направлены на достижение интегральной ценности возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетической безопасности [31]. Его концепция определяется многими факторами при оценке общих преимуществ топливных ресурсов перед возобновляемыми. Тогда измерение интегральной ценности возобновляемых источников энергии в энергетической безопасности возможно путем рассмотрения схемы интегрирующей модели развертывания возобновляемых

технологий в зоне децентрализованного энергоснабжения, картирования приоритетов в балансе между эффектами и затратами, связанными с внедрением возобновляемых источников энергии и устранением барьеров.

Потенциал возобновляемых ресурсов рассматривается не только в его величине, но и со стороны эффекта от его реализации: в социальном развитии территории, в экономическом, экологическом и технологическом аспекте, в стратегической перспективе. Одной из главных задач интеграции является устранение барьеров на пути внедрения возобновляемых источников энергии. Выявленные барьеры касаются различных отраслей промышленности. Это могут быть барьеры законодательного и информационного характера, технические, технологические, финансовые и другие. Представленная концепция наглядно показывает возможности территорий Севера и Арктической зоны в сочетании с трудностями их использования. Для различных структур эта схема может быть ориентиром при принятии решений и создании материально-технической базы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии. Как показывает анализ факторов децентрализованных зон Севера, существуют основные риски реализации проектов возобновляемой энергетики: технические риски, выражающиеся в высоком моральном и техническом износе оборудования; финансово-экономические риски; социальные риски, в большей степени связанные с дефицитом квалифицированных кадров [32].

Использование возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетической безопасности способствует расширению спектра мероприятий по поддержанию условий для реализации ее составляющих [33].

Для каждой децентрализованной зоны существует свое обозначение и возможность использования потенциала возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетической безопасности [34]. Роль возобновляемых источников энергии во внедрении технологий возобновляемой энергетики заключается в воздействии на другие процессы, такие как смягчение экологической обстановки, повышение надежности энергоснабжения, снижение нагрузки на энергетическое оборудование, изменение экономических

показателей производства и передачи энергии и др. Организация условий – это создание возможностей для реализации этого влияния.

Например, можно добиться социально-экономического эффекта:

- улучшение социальных условий жизни населения, проживающего на данной территории;
- перспективные изменения в инфраструктуре, структурная перестройка экономики, создание дополнительных рабочих мест в различных сферах;
- повышение общего уровня жизни населения;
- улучшение экологической обстановки с частичным сокращением вредных выбросов на территории энергетического объекта с традиционным топливным ресурсом;
- улучшение экономической ситуации при создании отечественных производителей технологий возобновляемой энергетики, развитие производственной базы по ремонту и техническому обслуживанию.

## **4.2 Анализ потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области**

### **4.2.1 Потенциал энергии ветра Магаданской области**

Магаданская область занимает огромную территорию, протяженностью на сотни километров как с запада на восток, так и с севера на юг. Её расположение в высоких широтах, наличие обширных и своеобразно расположенных горных систем, близость холодного Охотского моря и полюса холода Северного Ледовитого океана – все эти факторы оказывают большое влияние на формирование климата.

В центральных районах области климат континентальный, в его прибрежной части – муссонный.

Средняя годовая скорость ветра в центральных районах области составляет около 2-3 м/с, а на побережье около 7-8 м/с. Максимальная скорость ветра на побережье иногда превышает 40 м/с, а в центральных районах-около 20 м/с [35].

В таблице 4.1 представлены средние значения скорости ветра различных регионов Магаданской области.

Таблица 4.1 – Скорость ветра в Магаданской области

Расположение метеостанции	Средняя скорость ветра, м/с				Среднегодовая скорость ветра, м/с	Максимальная скорость ветра, м/с
	Зима	Весна	Лето	Осень		
г. Магадан	4,4	3,7	3,2	3,7	3,8	30
пгт Ола (Ольский р-н)	4,1	3,3	2,6	3,4	3,3	27
пгт Омсукчан (Омсукчанский р-н)	2,4	3,1	3,3	2,5	2,8	28
пгт Эвенск (Северо-Эвенский р-н)	5,3	4,3	2,9	4,2	4,2	35
пгт Сеймчан (Среднеканский р-н)	0,6	1,9	2,0	1,3	1,5	22
г. Сусуман (Сусуманский р-н)	0,9	1,9	2,0	1,3	1,6	27
пгт Усть-Омчуг (Тенькинский р-н)	1,9	2,3	2,1	1,9	2,1	20
пгт Палатка (Хасынский р-н)	2,6	2,4	1,5	2,1	2,2	21
пгт Ягодное (Ягоднинский р-н)	0,9	1,3	1,3	1,1	1,2	17

Как показывает проведенный анализ, наибольший ветроэнергетический потенциал имеет место в г. Магадан, также в Северо-Эвенском и Ольском районах. Административное деление Магаданской области представлено на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Административное деление Магаданской области

Таким образом, наиболее перспективными районами, где можно эффективно использовать ветровую энергию, является побережье Магаданской области. В этой зоне благоприятны для размещения и эксплуатации ВЭС и ВЭУ всех типов.

Высоким ветроэнергетическим потенциалом характеризуются Омсукчанский, Хасынский и Тенькинский районы. В этой зоне могут быть размещены средние ВЭУ, пригодные для выработки электроэнергии при начальной скорости ветра 2-3 м/с. Данная зона характеризуется высоким ветроэнергетическим потенциалом в летний период, что позволит эффективно использовать ВЭУ средней мощности.

Для Среднеканского, Сусуманского и Ягоднинского районов целесообразно эксплуатировать ВЭУ малой мощности.

#### 4.2.2 Потенциал солнечной энергии Магаданской области

Солнечная инсоляция – это величина, определяющая количество поверхностного облучения пучком солнечного света. Поверхность может быть любой, включая солнечную батарею, которая преобразует энергию солнца в электрическую энергию. Другими словами, солнечная инсоляция – это среднее количество часов в сутки, когда солнце светит на расчетную поверхность под прямым углом в ясную погоду.

Изучение солнечной активности во всех регионах нашей планеты осуществляется Национальным Управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA). На основе материалов компьютерной базы NASA, основанных на спутниковых измерениях и полученных значениях суммарной интенсивности солнечной радиации, была разработана карта инсоляции субъектов Российской Федерации, представленная на рисунке 4.2 [36].



Рисунок 4.2 – Карта инсоляции России



По рисунку 4.2 видно, что Магаданская область обладает высоким уровнем инсоляции.

Для правильного расчета мощности солнечных батарей так же следует учитывать инсоляцию по месяцам года. Среднесуточные показатели солнечной инсоляции по Магаданской области представлены в таблице 4.2 и на рисунке 4.3.

Таблица 4.2 – Солнечная инсоляция в Магаданской области

Месяц	Солнечная инсоляция в сутки, кВт·ч/м <sup>2</sup>
Январь	0,94
Февраль	1,91
Март	3,67
Апрель	5,16
Май	5,83
Июнь	6,28
Июль	5,68
Август	4,44
Сентябрь	3,53
Октябрь	2,44
Ноябрь	1,46
Декабрь	0,57
Среднее за год	3,50

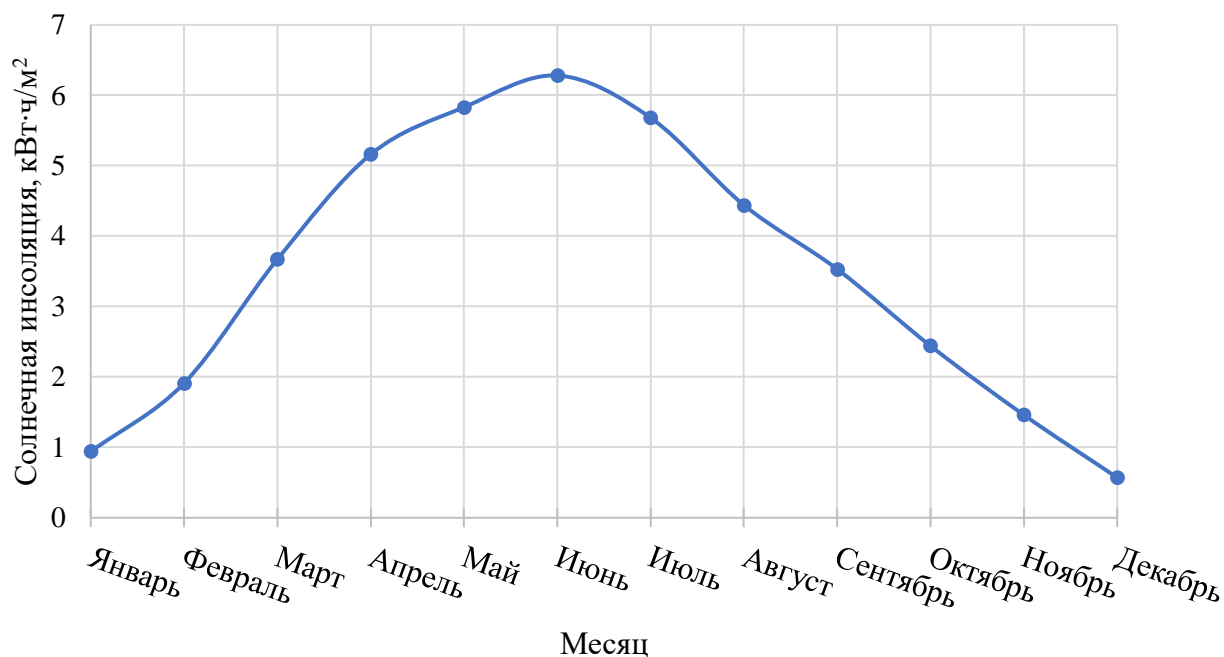


Рисунок 4.3 – Солнечная инсоляция в Магаданской области

Рисунок 4.3 показывает, что по меньшей мере 70% солнечной энергии приходится на сезон с апреля по август. В другое время солнечные преобразователи без дополнительных источников энергии использовать экономически нецелесообразно.

#### 4.2.3 Гидропотенциал рек Магаданской области

Густая речная сеть Магаданской области принадлежит бассейнам Северного Ледовитого и Тихого океанов. Средняя густота речной сети составляет 0,87 км/км<sup>2</sup>.

Более 200 тысяч рек общей протяженностью около 380 тыс. км протекает по территории Магаданской области. Самая крупная и многоводная – Колыма, длина реки 2129 км, площадь водосбора 647тыс. км<sup>2</sup>. Наиболее крупные реки площадью водосбора свыше 5 тыс. км<sup>2</sup>: Гижига, Берелех, Таскан, Буюнда, Кулу, Детрин, Дебин, Сугой, Бохапча, Тауй, Аян-Юрях.

Ресурсы речных вод области по среднему годовому стоку составляют 132 км<sup>3</sup>, из них 72 км<sup>3</sup>/год принадлежат бассейну р. Колыма (Восточно-Сибирское море), 60 км<sup>3</sup>/год – рекам бассейна Охотского моря.

Приток речных вод в Магаданскую область осуществляется с территории Хабаровского края по рекам Кулу и Кава в объеме 6,65 км<sup>3</sup>/год.

В зимние месяцы (ноябрь-апрель) на многих водотоках сток прекращается совсем, лишь на отдельных реках проходит до 20% стока. Большинство рек (90%) – это малые и перемерзающие водотоки с низкой водностью. Внутригодовое распределение стока на территории области отличается крайней неравномерностью. В мае-октябре протекает до 99% стока.

Отток речных вод из области происходит: в Республику Саха по рекам Тымтей, Поповка, Худжах, Ясачная, Омулевка, Делянكير, Белая Ночь, Колыма – 56,1 км<sup>3</sup>/год; в Чукотский АО по р.Омолон –18,1 км<sup>3</sup>/год; в Камчатскую область по р. Парень - 4,72 км<sup>3</sup>/год. Значительный объем речного стока уходит в Охотское море - 59,9 км<sup>3</sup>/год [37].

На основании анализа гидроэнергетического потенциала определены районы, приемлемые для установки МГЭС на территории Магаданской области. На рисунке 4.4 красным цветом отмечены территории, которые характеризуется низким гидропотенциалом и/или климатическими показателями неприемлемыми для установки сезонных МГЭС; синим – территории, которые характеризуется средним гидропотенциалом и климатическими показателями приемлемыми для установки сезонных МГЭС; зеленым – территории, которые характеризуется высоким гидропотенциалом и климатическими показателями приемлемыми для установки сезонных МГЭС.

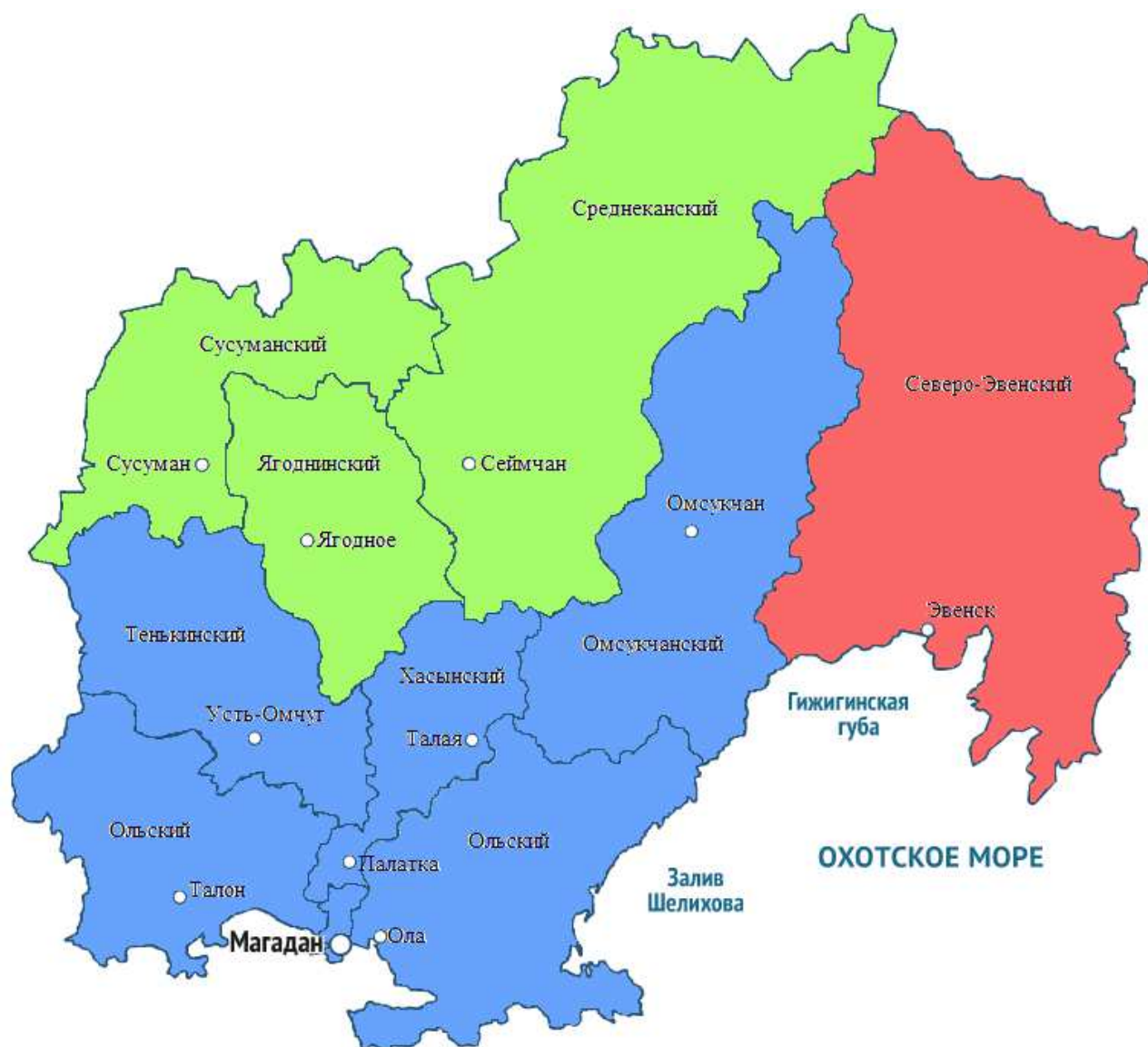


Рисунок 4.4 – Гидропотенциал рек Магаданской области

При использовании водных ресурсов необходимо учитывать колебания их объемов по годам (маловодные и многоводные годы) и особенности их распределения в течение года. Реки Магаданской области подчиняются общим законам циклических колебаний водообеспеченности, и на них, как и на других водотоках России, периоды маловодья сменяются периодами половодья. На крупных реках разница между объемами стока в маловодные и многоводные годы относительно невелика.

В результате комбинированного воздействия преимущественно вечной мерзлоты и экстремально низких температур зимой малые и средние реки замерзают и прекращают сток.

Территория Магаданской области расположена в зоне сурового субполярного и арктического климата с вечной и сезонной мерзлотой. Продолжительность периода со среднесуточной температурой свыше 5°C составляет 90-100 дней. Безморозный период длится в среднем 80 дней. В регионе ежегодно выпадает до 700 мм осадков, из них от 120 до 350 мм в теплое время года. Они распределены чрезвычайно равномерно. Специфика региона заключается в почти повсеместном распространении вечной мерзлоты при максимальной глубине оттаивания в песчаных и суглинистых почвах до 2-4 м.

Использование гидроэлектростанций в Магаданской области ограничено безморозным сезоном. Поэтому внедрение гидроэнергетических установок в местный энергетический сектор региона должно быть сопряжено с решением вопроса о структуре автономной системы электроснабжения.

## **5 Моделирование данных потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области**

### **5.1 Эффективность применения информационной базы возобновляемых источников энергии в районах Магаданской области**

Геоинформационные системы (ГИС) являются эффективными технологиями при изучении неравномерного размещения в пространстве потенциала возобновляемых источников энергии в Магаданской области. Платформой для обеспечения геоинформационного моделирования являются пространственные данные. Поэтому возникает необходимость сбора и анализа данных о потенциале возобновляемых источников энергии на основе электронных карт и атрибутивных данных [38].

Примером ГИС-решения для анализа проектов по использованию возобновляемых источников энергии является геоинформационная система "Возобновляемые источники энергии в Томской области" [39], государственный кадастр возобновляемых источников энергии Республики Беларусь [40].

Одной из первых задач ГИС возобновляемых источников энергии Магаданской области является формирование ресурсной базы возобновляемых источников энергии на основе атрибутивных данных, электронных карт о потенциалах возобновляемых источников энергии.

Для проведения предварительной процедуры кластеризации в модуле Cluster Analysis программы STATISTICA был произведен сбор и обработка массивов возобновляемых источников энергии в Магаданской области с ключевыми характеристиками: ветровым, солнечным энергетическим потенциалом и речным гидропотенциалом.

Кластерный анализ позволяет рассмотреть базу данных возобновляемых источников энергии, выделить самостоятельные группы (кластеры), их характеристики во всей совокупности анализируемых показателей возобновляемых источников энергии.

Обработка базы данных возобновляемых ресурсов дает возможность не только манипулировать обрабатываемыми данными, демонстрировать существующие взаимосвязи между ними, видеть территориальный охват и доступность данных, но и анализировать потенциал альтернативных источников энергии, изучать неравномерность ее пространственного распределения, а также выявлять наиболее перспективные направления для строительства энергогенерирующих объектов. Кластеризация помогает лучше понять анализируемые данные.

Основными источниками информации из ресурсной базы ВИЭ являются:

1. Картографические данные. Цифровой формат картографической информации используется в качестве картографического слоя в ГИС.
2. Данные из средств дистанционного зондирования земной поверхности, полученные бесконтактным способом (База климатологических данных NASA Surface meteorology and Solar Energy [41]).
3. Данные наблюдений со станций (метеорологических, гидрологических).
4. Документальные архивы, государственная статистика.

## **5.2 Классификация исходных параметров возобновляемых источников энергии в кластерном анализе**

Область применения математической статистики может включать задачи, связанные с анализом потенциала возобновляемых источников энергии с помощью кластерного анализа.

Существует электронная площадка для геоинформационного моделирования. Информационное наполнение ресурсной базы структурировано по показателям использования возобновляемых источников энергии (ветра, солнца, воды) в Магаданской области. Для каждого показателя была разработана структура базы данных, охватывающая характеристики ресурсов с привязкой к координатам. При формировании информационной базы возобновляемых источников энергии Магаданской области был использован подход влияния

каждого параметра на расчет и выбор установки на основе возобновляемых источников энергии. По существу, база данных включает в себя почти все основные характеристики возобновляемых источников энергии.

К показателям потенциала энергии ветра относятся: скорость ветра, среднегодовая скорость, валовый потенциал ветроэнергетики. Показатели солнечной энергии включают в себя ежемесячное и годовое количество радиации, годовое количество радиации на горизонтальной поверхности, продолжительность солнечного света и количество дней без солнца в году. Энергетическими показателями рек являются средний напор, расход воды, суммарная потенциальная мощность и энергия. Впоследствии эта разработка может быть интегрирована в геоинформационную систему, и для эффективной работы системы необходимо систематически дополнять данные для отображения текущих показателей ВИЭ.

Эта географически привязанная электронная платформа поможет определить целесообразность использования потенциала возобновляемых источников энергии в системе энергоснабжения Магаданской области для решения проблемы децентрализованного потребителя.

Сводные таблицы привязки районов к кластерам для моделей интеллектуального анализа ВИЭ представлены в таблицах 5.1 – 5.3.

Созданные описательные модели интеллектуального анализа могут быть использованы для комплексной оценки потенциалов ВИЭ на территории Магаданской области, они представлены на рисунках 5.1 – 5.3.

Результаты кластерного анализа ресурсов ВИЭ в виде древовидных дендрограмм представлены на рисунках 5.4 – 5.6, в виде графиков средних для каждого кластера – на рисунках 5.7 – 5.9, кластеризации методом Two-way joining – на рисунке 5.10 – 5.12.



Таблица 5.1 – Сводная таблица привязки районов к кластерам по ветроэнергетическим ресурсам

Номер кластера	Члены кластера (районы)	Показатели кластеризации	Средние значения показателей
1	г. Магадан, Северо-Эвенский, Ольский	средняя скорость ветра, м/с	3,77
		мощность, Вт/м <sup>2</sup>	220,12
		удельная энергия ветра, кВт·ч/м <sup>2</sup>	1901,87
2	Омсукчанский, Хасынский, Тенькинский	средняя скорость ветра, м/с	2,37
		мощность, Вт/м <sup>2</sup>	55,88
		удельная энергия ветра, кВт·ч/м <sup>2</sup>	482,81
3	Сусуманский, Среднеканский, Ягоднинский	средняя скорость ветра, м/с	1,43
		мощность, Вт/м <sup>2</sup>	12,28
		удельная энергия ветра, кВт·ч/м <sup>2</sup>	106,10

Таблица 5.2 – Сводная таблица привязки районов к кластерам по ресурсам солнечной энергии

Номер кластера	Члены кластера (районы)	Показатель кластеризации	Средние значения показателей
1	г. Магадан, Ольский, Сусуманский, Тенькинский, Хасынский, Ягоднинский	годовая интенсивность суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м <sup>2</sup>	1094,72
2	Омсукчанский, Среднеканский		1010,28
3	Северо-Эвенский		936,67

Таблица 5.3 – Сводная таблица привязки районов к кластерам по гидроэнергетическим ресурсам

Номер кластера	Члены кластера (реки)	Показатели кластеризации	Средние значения показателей
1	Колыма	гидроэнергетический потенциал, тыс. кВт	20392,047
		площадь бассейна, км <sup>2</sup>	643000
		длина реки, км	2129
		среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с	3900
2	Омолон, Гижига, Балыгычан, Бёрёлөх, Сугой, Парень, Коркодон, Булун, Нявленга	гидроэнергетический потенциал, тыс. кВт	2212,83
		площадь бассейна, км <sup>2</sup>	26188,75
		длина реки, км	383,38
		среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с	300,63
3	Кегали, Буюнда, Таскан, Сеймчан, Бахапча, Яма, Ола, Армань, Яна, Кулу, Аян-Юрях, Кедон, Бургачан, Туманная, Насончик, Эльгечан, Кюрколчан, Великан, Ниванда, Авекова, Большая Гарманда, Наяхан, Хетагчан, Килгана, Малтан, Мылга, Тауй, Кава, Челомджа, Дебин	гидроэнергетический потенциал, тыс. кВт	402,14
		площадь бассейна, км <sup>2</sup>	11356,52
		длина реки, км	240,81
		среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с	83,31

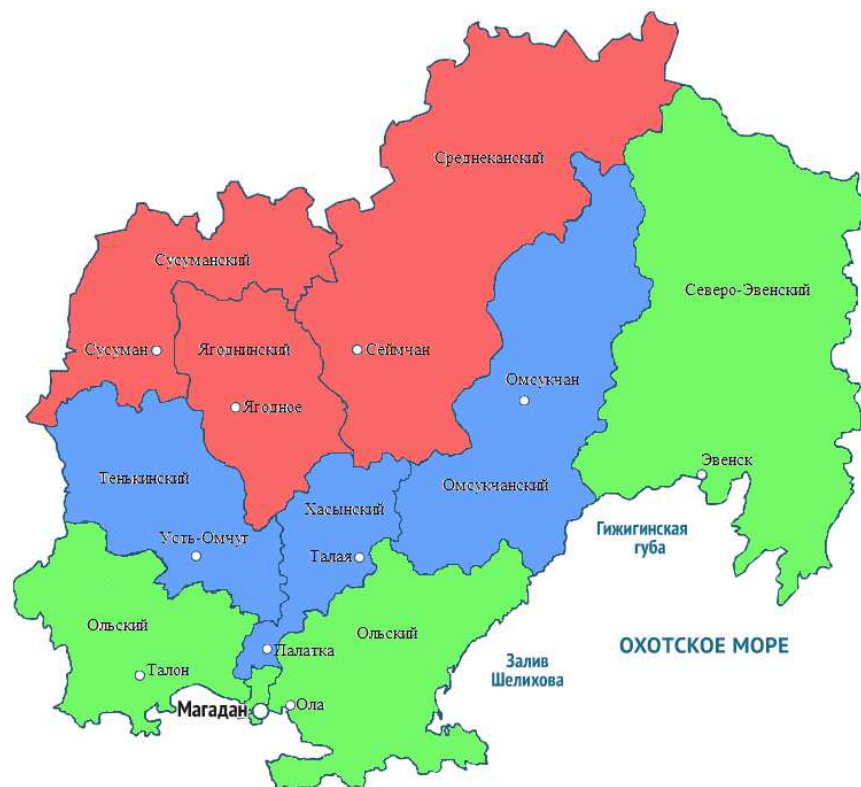


Рисунок 5.1 – Модель интеллектуального анализа ветроэнергетических ресурсов Магаданской области

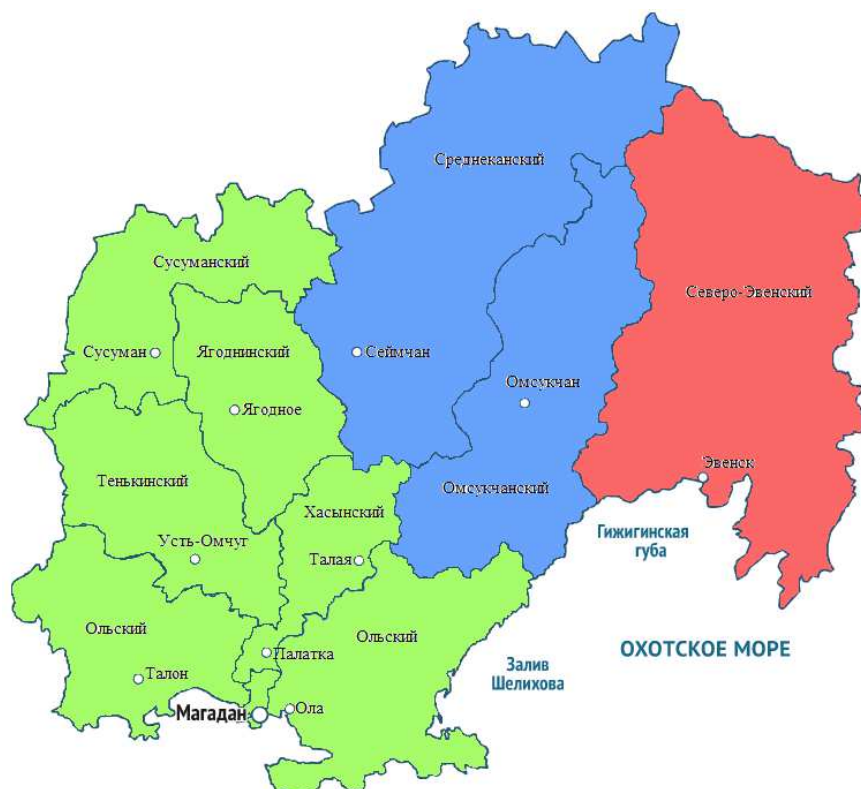


Рисунок 5.2 – Модель интеллектуального анализа ресурсов солнечной энергии Магаданской области

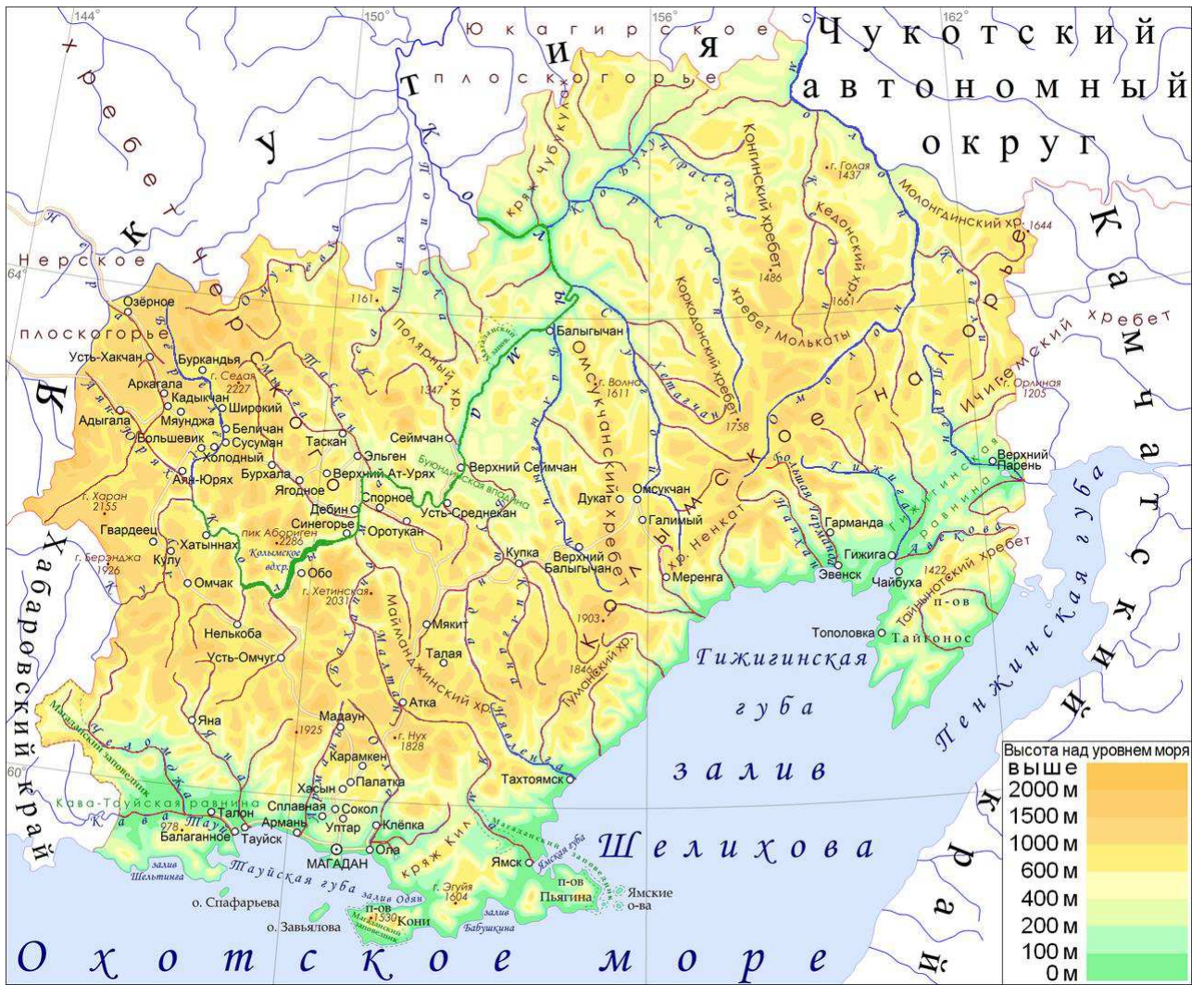


Рисунок 5.3 – Модель интеллектуального анализа гидроэнергетических ресурсов Магаданской области

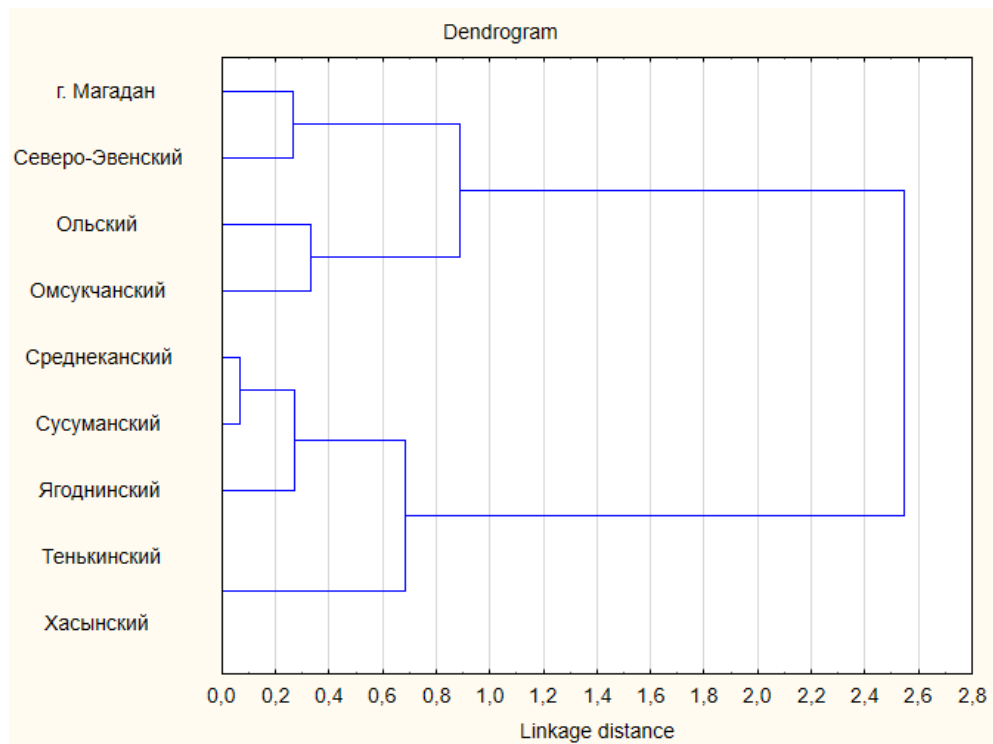


Рисунок 5.4 – Древоподобная дендрограмма ветроэнергетических ресурсов  
Магаданской области

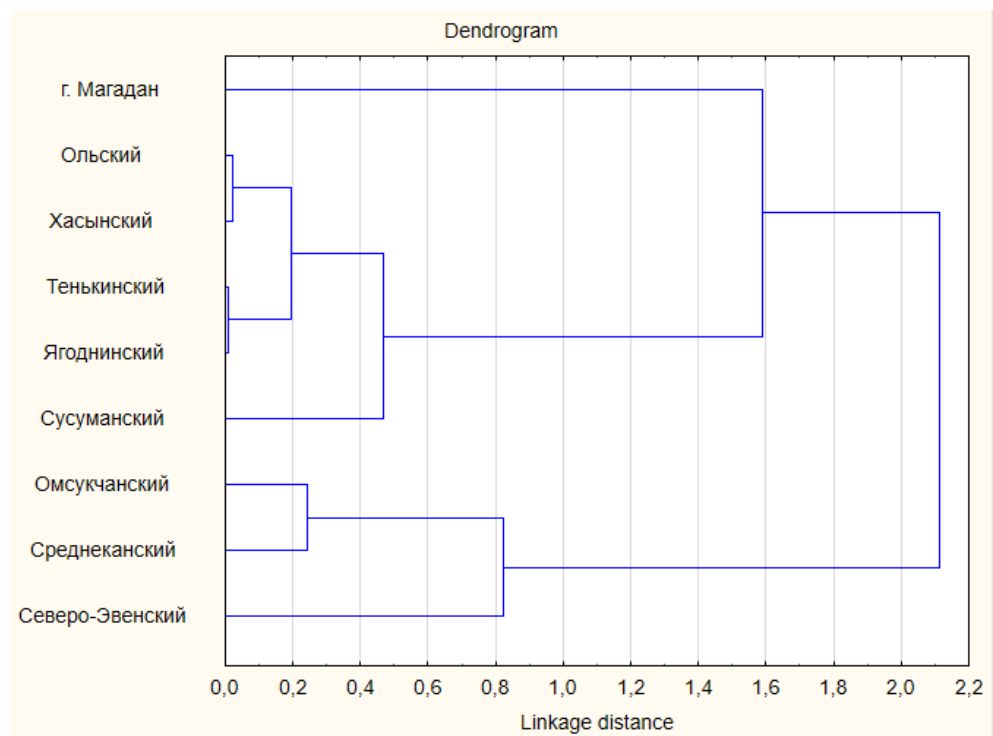


Рисунок 5.5 – Древоподобная дендрограмма ресурсов солнечной энергии  
Магаданской области

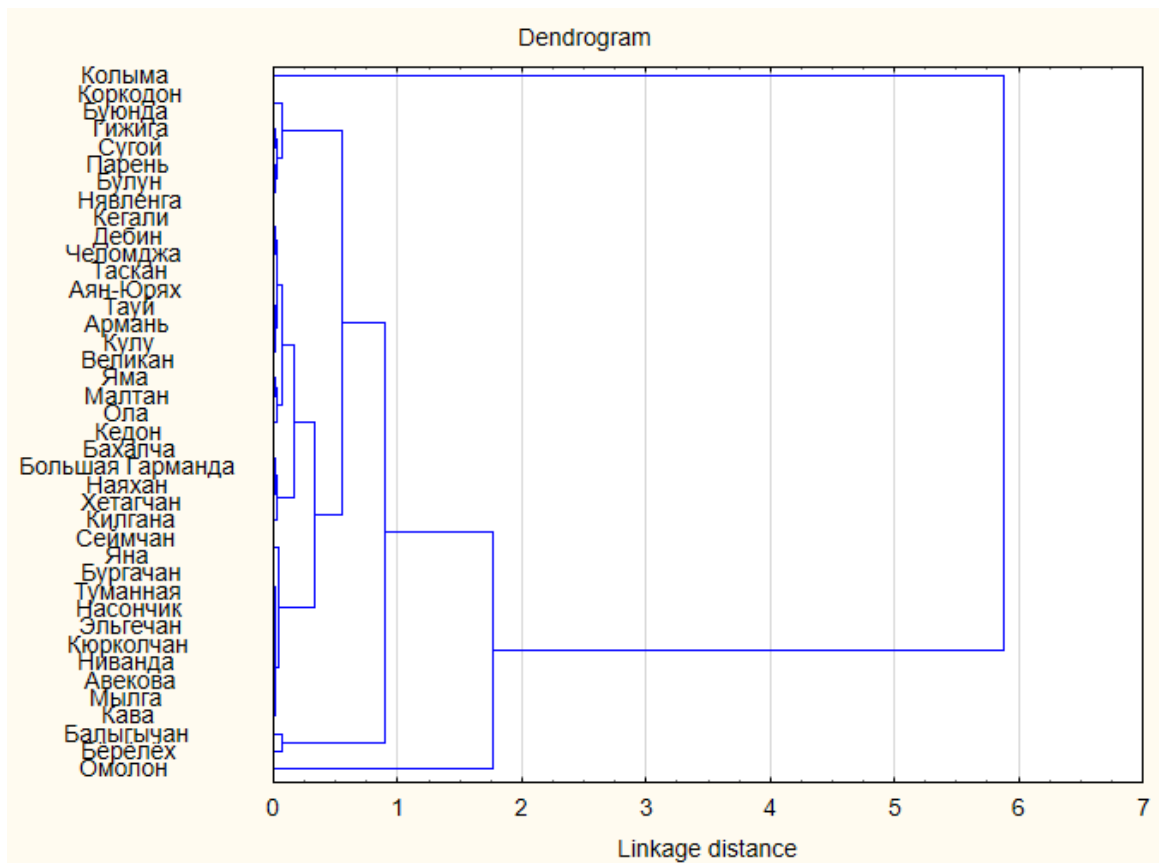


Рисунок 5.6 – Древоподобная дендрограмма гидроэнергетических ресурсов  
Магаданской области

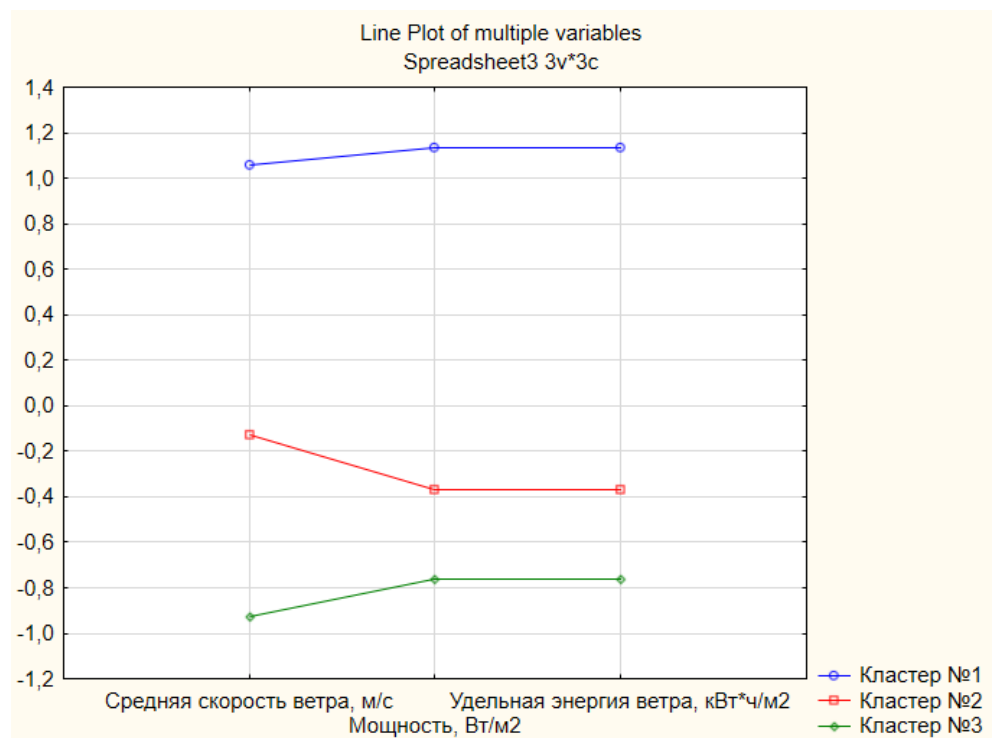


Рисунок 5.7 – График средних для каждого кластера ветроэнергетических  
ресурсов Магаданской области

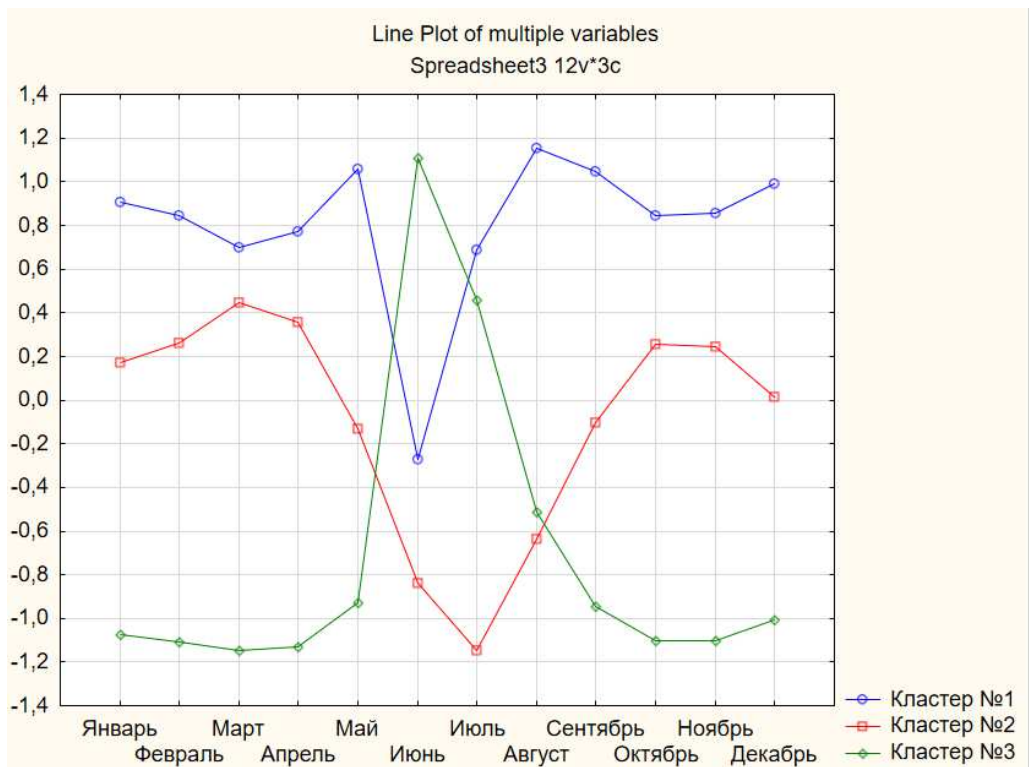


Рисунок 5.8 – График средних для каждого кластера ресурсов солнечной энергии Магаданской области

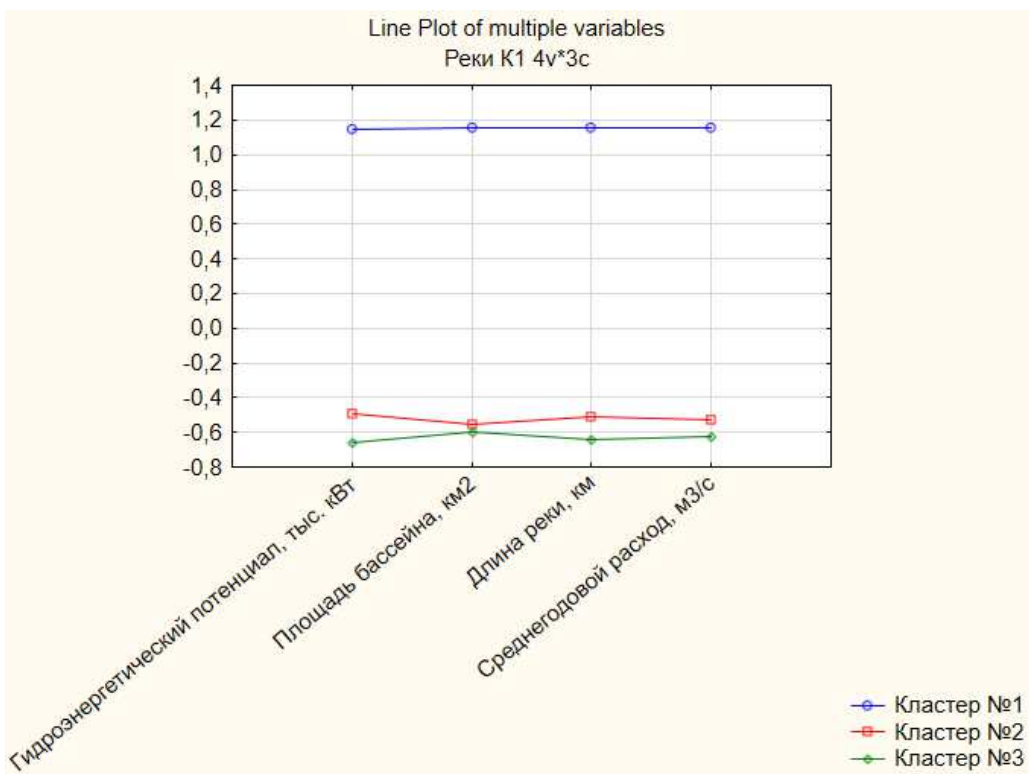


Рисунок 5.9 – График средних для каждого кластера гидроэнергетических ресурсов Магаданской области

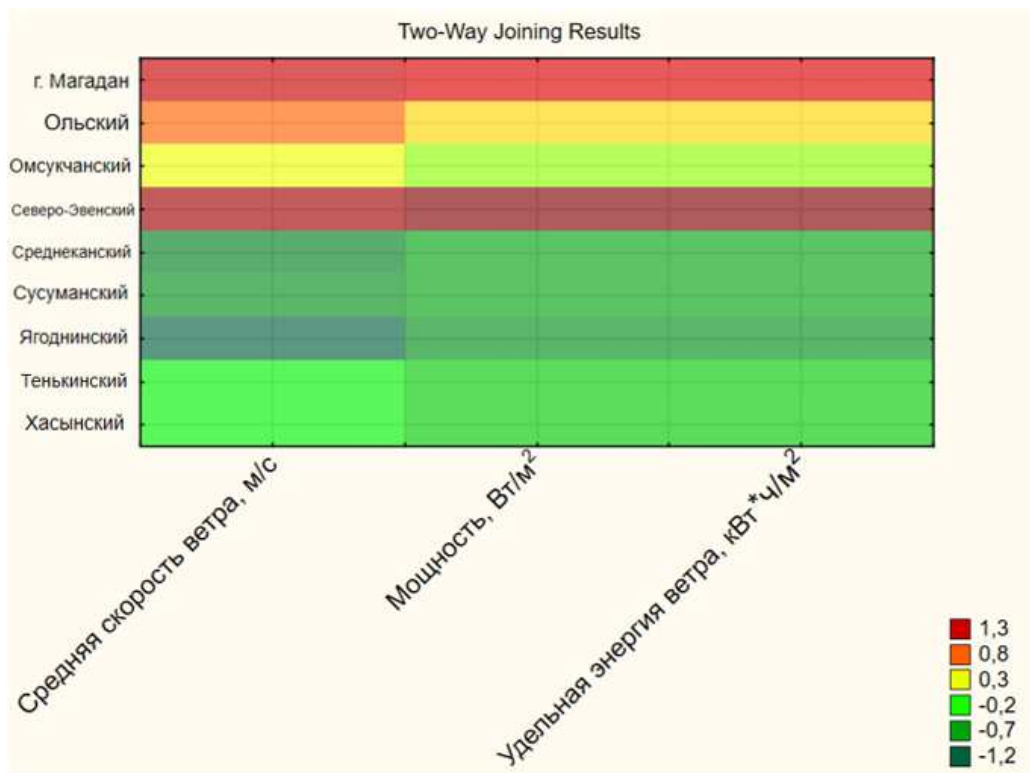


Рисунок 5.10 – Результат кластеризации методом Two-way joining ветроэнергетических ресурсов Магаданской области

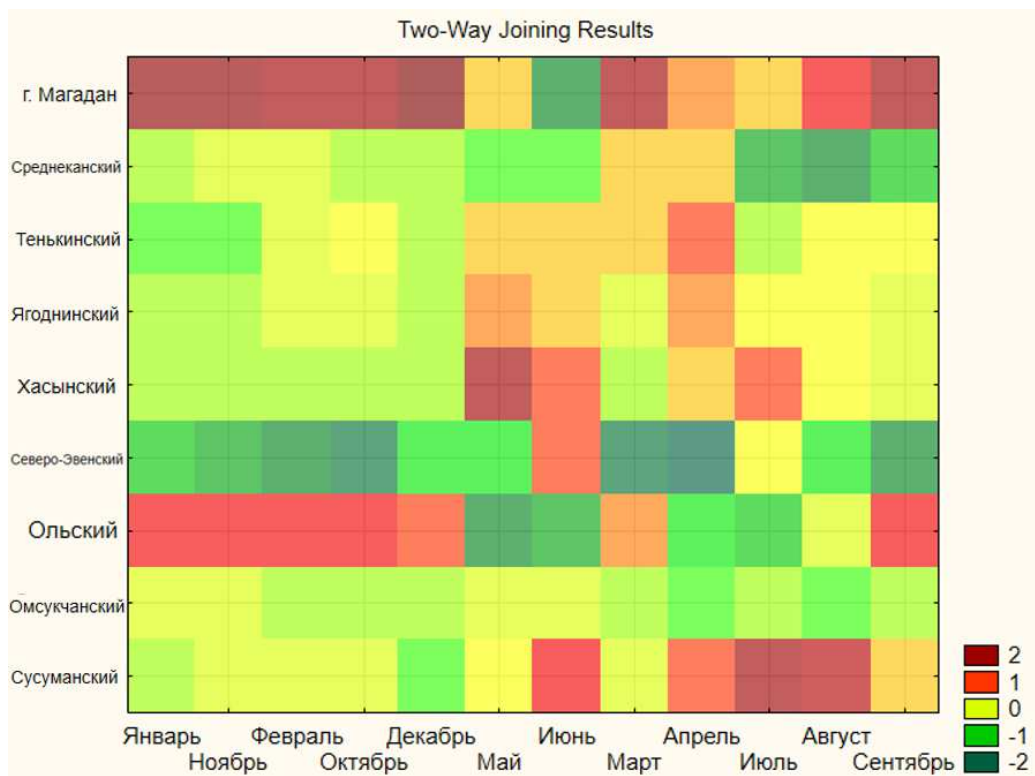


Рисунок 5.11 – Результат кластеризации методом Two-way joining ресурсов солнечной энергии Магаданской области



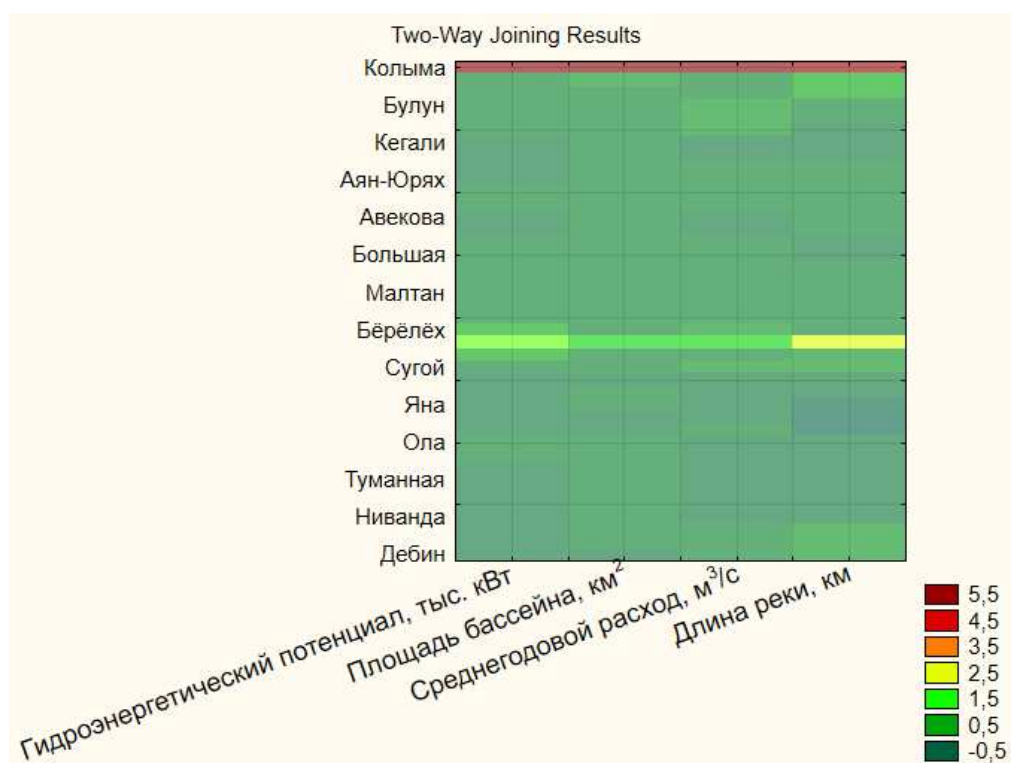


Рисунок 5.12 – Результат кластеризации методом Two-way joining гидроэнергетических ресурсов Магаданской области

Для Магаданской области развитие возобновляемых источников энергии является одним из перспективных путей модернизации существующей системы энергоснабжения. А если учесть специфику региона, где производство энергии для немногих потребителей должно производиться локально на огромной территории, то автономные системы, использующие природные вещества и процессы для выработки энергии, являются наиболее экономически, технически и экологически выгодными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации по теме «Оценка надежности гибридных систем выработки электроэнергии, предназначенных для работы на Крайнем Севере» решалась проблема использования ВИЭ на территории Магаданской области.

Анализ потенциала возобновляемых источников энергии Магаданской области показал их достаточность для обозначения их роли в обеспечении энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения.

Возобновляемые источники энергии в таких районах могут конкурировать с достаточно дорогими традиционными объектами электроснабжения. Специфика децентрализованных территорий Севера становится плюсом для реализации проектов возобновляемой энергетики в таких условиях. Внедрение возобновляемых технологий с учетом требований к арктическим характеристикам для эксплуатации в условиях экстремального климата является трудоемким вопросом, но в то же время требует значительных финансовых вложений. Но себестоимость будет соизмерима, если учесть экономию топливных ресурсов при использовании возобновляемых источников энергии, а также экологическую составляющую себестоимости электроэнергии, получаемой от традиционных электростанций.

Сегодняшние выводы аналитиков свидетельствуют о том, что инвестиции в технологии возобновляемой энергетики уже будут несколько ниже финансовых объемов, необходимых для затрат на борьбу с загрязнением окружающей среды от традиционных электростанций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: [утверждена распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р]. – М., 2014. – 97 с.
2. Фортов, В. Е. Возобновляемые источники энергии для энергоснабжения потребителей в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Энергетический вестник. – 2010. – № 1 (8). – С. 9–29.
3. Елистратов, В. В. Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратов // Энергетический вестник. – 2016. – № 21. – С. 42-49.
4. Штерн, В. И. Эксплуатация дизельных электростанций / В.И. Штерн. – М.: Энергия, 1980. – 120 с.
5. Суфлян, Д.А. Проблемы надежности автономных систем электроснабжения децентрализованной энергозоны / Д.А. Суфляр, В.Р. Киушкина // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: Материалы X Всероссийской научно-технической интернет-конференции, Том 1, Пермский нац. иссл. политех. ун-т, Пермь, 2016. – С. 46-52.
6. Суржикова, О. А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. – 2012. – №3 (4). – С. 103-108.
7. Соснина, Е.Н. Вопросы электроснабжения потребителей удаленных от сетевой инфраструктуры / Е.Н. Соснина, А.Ю. Кечкин, Д.А. Филатов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5(107). – С. 100-105.
8. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов, В. И. Виссарионов и др. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.


9. NASA Surface meteorology and Solar Energy // Atmospheric science data center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>
10. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 128 с.
11. Обухов, С. Г. Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов: учебное пособие / С. Г. Обухов – Томск: Изд-во Томского политехнического института, 2008. – 140 с.
12. Велькин, В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах: монография / В.И. Велькин – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
13. Попель, О. С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии / О. С. Попель // Энергосбережение. – 2006. – № 3. – С. 70-75.
14. Дерюгина, Г. В. Гибридные энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии / Г. В. Дерюгина, М. Г. Тягунов, Т. А. Шестопалова, В. А. Юриков // Вестник КРСУ. – 2012. – №10(12). – С. 11-17
15. Артюхов, И. И. Варианты построения схем автономных ветродизельных установок / И.И. Артюхов, Е.Т. Ербаев // Новые технологии и технические средства в АПК: Материалы Международной конференции. – Саратов: КУБиК, 2013. – С. 9–11.
16. Обухов, С. Г. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергии / С. Г. Обухов, И. А. Плотников // Промышленная энергетика. – 2012. – №7. – С. 46–51.
17. Григораш, О. В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О. В. Григораш, П. В. Корзенков // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – №93(9). – С. 1-13.

18. Современное состояние и потенциал развития Магаданской области. Том I, Сибирский зональный научно-исследовательский и проектный институт, 2009 – 153 с.
19. Жилиев Д.А., Башенёв М.И., Жилиев А.А. Анализ потенциала солнечной и ветроэнергетики в России // Современная техника и технологии. 2017. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2017/07/13715>
20. Атлас ветров России // А.Н. Старков, Л.Ландберг, П.П.Безруких, М.М.Борисенко. – М.: Российско-датский институт энергоэффективности, 2000.
21. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.
22. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. , 1990. – 24 с.
23. Колпаков А. И. Энергия, принесенная ветром. Ветроэнергетические установки и ветрогенераторы // Силовая электроника №3'2005.
24. Тушинский машиностроительный завод. От "Стали" до "Бурана": история, технология, люди. М.: АвиаРус–XXI, 2001. – С. 79–81.
25. Кочуров, А.А. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышении эффективности способов их восстановления: монография / А.А. Кочуров, В.Ю. Гумелев, Н.П. Шевченко; под общ. ред. А.А. Кочурова. – Рязань: Ряз. высш. возд.-дес. ком. учще, 2012. – 252 с.
26. Яковлева, Э. В. Расчет надежности электротехнического комплекса с фотоэлектростанцией / Э.В. Яковлева, С.В. Батулин // Современная техника и технологии – 2015. – №5(45) – С.53-56.
27. Тремясов, В. А. Надежность электроснабжения / В.А. Тремясов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 163 с.
28. Бобров, А. В. Ветродизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении / А.В. Бобров, В.А. Тремясов. – Красноярск: Сиб.федер.ун-т, 2012. – 216 с.

29. Карамов Д.Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергокомплексов, использующих возобновляемые источники энергии и накопители энергии: дис. ...канд. техн. наук: 05.14.01 / Карамов Дмитрий Николаевич. – Иркутск, 2016. – 152 с.
30. Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды [Электронный ресурс] // Новости RenEn (13.06.2017). Режим доступа: <http://renew.ru/integration-of-res-into-the-energysystem-practice-myths-and-legends>.
31. Киушкина В.Р., Шацева А.А. Кислова А.П., Сарсикеев Е.Ж. Интеграция возобновляемых источников энергии на территории Дальнего востока // Вестник ПГУ. Энергетическая серия, № 2.
32. Храмцова А.П., Носков М.Ф. Оценка проблем надежности гибридных систем выработки электроэнергии // Гидроэлектростанции в XXI веке, 2019.
33. Киушкина В.Р. Возобновляемые источники энергии в энергетической безопасности локальных энергозон. // Промышленная энергетика. – № 9 - 2016.
34. Киушкина В.Р. Проблемы энергообеспеченности с позиции энергетической безопасности изолированных энергозон Арктических территорий // Сборник трудов Международного форума «Арктика: общество, наука и право» - Санкт-Петербург: СПбГУ, 2018.
35. Климат Магаданской области [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.liveinternet.ru/community/2408720/post80074526>.
36. Таблицы солнечной энергии и инсоляции в регионах России [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kolichestvo-solnechnoy-energii-v-regionah-rossii>.
37. Доклад об экологической ситуации Магаданской области в 2018 году // Министерство природных ресурсов и экологии Магаданской области. – г. Магадан, 2019. – 22 с.

38. Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н. Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии.– 2009.– №11.– С. 32-36.
39. Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии в Томской области» [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://green.tsu.ru/tomres/?page\\_id=1137](http://green.tsu.ru/tomres/?page_id=1137).
40. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Электронные информационные ресурсы [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_19948904-ru](http://minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru).
41. Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России» [Электронный ресурс] – Принципы построения базы данных NASA SEE. // Режим доступа: <http://gis.vov.ru/htm/at1/gl2.html>.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ  
Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей»

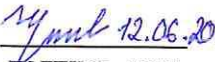
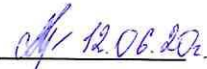
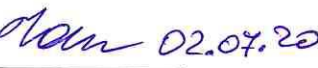
УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
  
«02» 07 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ВЫРАБОТКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ НА  
КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ**

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Научный руководитель	 подпись, дата	_____ должность, ученая степень	<u>М.Ф. Носков</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>А.П. Храмцова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	12.06.20  подпись, дата	Зам. начальника СКД Колымской ГЭС _____ должность, ученая степень	<u>К.Л. Фролов</u> инициалы, фамилия
Нормоконтроль	 подпись, дата		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черёмушки 2020