

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Братский государственный университет»**

На правах рукописи



АРТЕМЬЕВ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ РЕШЕНИЙ ПО
ВВОДУ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ
СИСТЕМНОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Шакиров В. А.

Братск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ.....	16
1.1. Анализ состояния, проблем и перспектив ветроэнергетики в России...	16
1.2. Задачи, возникающие при развитии генерирующих мощностей с использованием энергии ветра.....	24
1.3. Анализ методической и нормативной базы для решения задач ввода ветроэнергетических мощностей.....	29
1.4. Программные продукты для анализа решений задачи ввода ветроэнергетических мощностей.....	41
1.5. Обзор методов принятия решений для задач ввода ветроэнергетических мощностей	48
1.6. Выводы по первой главе.....	57
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	59
2.1. Поддержка принятия решений при выборе района для размещения ВЭС.....	59
2.1.1. Формулировка задачи многокритериального выбора района размещения ВЭС.....	60
2.1.2. Выбор метода принятия решений для многокритериальной оценки района размещения	
2.1.3. Разработка методики многокритериального выбора района размещения ВЭС ВЭС.....	63
2.2. Разработка методики принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок.....	70
2.3. Разработка методики многокритериального выбора площадок для размещения ВЭС.....	77
2.3.1. Формулировка задачи многокритериального выбора площадок размещения ВЭС.....	77
2.3.2. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала.....	79
2.4. Выводы по главе 2.....	86

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ВВОДА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	88
3.1. Постановка задачи.....	88
3.2. Описание программы для ЭВМ «Wind - MCA».....	89
3.2.1 Разработка модуля анализа ветроэнергетического потенциала.....	90
3.2.2 Модуль анализа ветроэнергетических установок.....	95
3.2.3. Модуль экономического анализа.....	97
3.2.4 Разработка модуля многокритериального анализа.....	99
3.3 Оценка экономической эффективности районов размещения ВЭС.....	104
3.4. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭС.....	112
3.5. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭУ с учетом неопределенности предпочтений.....	125
3.6. Анализ влияния рельефа местности при оценке эффективности применения ВЭС в районе и выборе площадок ЛПР.....	129
3.7. Многокритериальный выбор площадок для размещения ВЭС.....	136
3.8. Выводы по главе 3.....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	144
Приложение 1.....	172
Приложение 2.....	173
Приложение 3.....	174
Приложение 4.....	175
Приложение 5.....	176
Приложение 6.....	177
Приложение 7.....	178

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

CFD - computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика)

MAUT - Multi-Attribute Utility Theory (многокритериальная теория полезности)

SMART - the Simple Multi Attribute Rating Technique (простой способ многомерного упорядочивания)

АЭС - атомная электростанция

ГИС - геоинформационные системы

ГСМ - горюче-смазочные материалы

ГЭС - гидроэлектростанция

ДЭС - дизельная электростанция

ВИЭ - возобновляемые источники энергии

ВЭС - ветроэлектростанция

ВЭУ - ветроэнергетическая установка

ЛПР - лицо, принимающее решения

МАИ - метод анализа иерархий

МФЦ - многокритериальная функция ценности

ОФЦ - однокритериальная функция ценности

СППР – система поддержки принятия решений

СЭС - солнечные электростанции

ТЭС - тепловые электростанции

ЧДД - чистый дисконтированный доход

ЭЭС - электроэнергетические системы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Согласно проекту Энергетической стратегии России на период до 2035 года одним из направлений является использование нетрадиционных источников энергии, в том числе ветроэнергетических установок (ВЭУ). Согласно схеме территориального планирования размещения объектов федерального значения в области энергетики планируется введение 1030 МВт мощностей ВЭУ к 2025 году, а к 2030 году – 6060 МВт. В мире же было введено 51,3 ГВт только за один 2018 год.

Россия обладает значительными ветровыми ресурсами: общий экономический потенциал ветровой энергии, определенный для современных экономических условий, составляет около 70 ТВт·ч в год, то есть около 30% производства электроэнергии всеми электростанциями России. Ветровые ресурсы на территории страны распределены достаточно неравномерно, так примерно 30% экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, 14% – в Северном экономическом районе, около 16% – в Западной и Восточной Сибири. Развитие ветроэнергетики в России особенно актуально: в зоне децентрализованного энергоснабжения, составляющей порядка 70% территории страны; в рекреационных зонах; на приморских территориях с высоким ветроэнергетическим потенциалом.

При вводе ветроэнергетических мощностей встаёт ряд важных задач, из которых особенное значение имеют задачи принятия решений: выбора района для размещения ветроэлектростанций (ВЭС), выбора площадок для размещения ВЭС, выбора количества и моделей ВЭУ.

Большой вклад в развитие теории, разработку методов обоснования технических решений задач энергетики, в том числе на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, внесли: Д.А. Арзамасцев, П.И. Бартоломей, П.П. Безруких, Л.С. Беляев, В.И. Виссарионов, А.З. Гамм, В.В. Елистратов, И.Ю. Иванова, Б.В. Лукутин, Л.А. Мелентьев, В.Д. Николаев, Д.Д.

Ноговицын, С.Г. Обухов, В.Р. Огороков, Н.А. Петров, Б.Г. Санеев, В.А. Тремясов, В.П. Харитонов, Д.С. Щавелев и другие ученые.

Большой вклад в развитие теории принятия решений внесли ученые: Р. Беллман, С.Н. Васильев, Л. Заде, Д. Канеман, Р. Кини, О.И. Ларичев, О. Моргенштерн, Дж. фон Нейман, В.Д. Ногин, Э. Парето, А.Б. Петровский, В.В. Подиновский, Х. Райфа, Т. Саати, А. Тверски, П. Фишберн и др.

Применяемые в настоящее время подходы к принятию решений по вводу ветроэнергетических мощностей основаны на экономической оценке проекта, а экологические, социальные и другие факторы выступают в роли ограничений. В условиях повышения важности экологических требований, увеличения активности природоохранных и общественных организаций учет неэкономических факторов может иметь решающее значение, особенно при сравнении проектов с близкой экономической эффективностью. Поэтому целесообразно применение многокритериального подхода, поскольку он позволяет решить задачу с позиций предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР) и, таким образом, реализовать достижение высоких оценок по важным критериям. Принятие решений при вводе ветроэнергетических мощностей усложняется рядом факторов: высокий уровень неопределенности исходной информации, будущих условий, неопределённости предпочтений ЛПР; слабая структурированность, отсутствие специализированных систем поддержки принятия решений (СППР). В этой связи задачи ввода ветроэнергетических мощностей требуют совершенствования методического, математического и программного обеспечения. Можно выделить следующие направления совершенствования:

1. Необходимость учёта многих критериев.

При анализе вариантов ввода ветроэнергетических мощностей необходимо учитывать не только экономические факторы. Замещение традиционных источников энергии ветроэнергетическими мощностями приводит с одной стороны к уменьшению отдельных воздействий на окружающую среду, но оказывает другие на нее воздействия. Размещение ветроэлектростанций в

рекреационных зонах, в удаленных районах с децентрализованным электроснабжением имеет социальный эффект. Эти факторы необходимо обязательно учитывать при вводе ветроэнергетических мощностей для получения обоснованных решений. Необходимо стремиться не только выполнить нормативные требования в отношении экологии, но стараться максимизировать положительные воздействия на окружающую среду, на здоровье и безопасность населения. Для решения задач в такой постановке необходимо использовать методы многокритериального анализа.

2. Повышение уровня формализации решения задач ввода ветроэнергетических мощностей.

При решении задач ввода ветроэнергетических мощностей возникают трудности учёта неопределенности и неполноты исходной информации, факторов, не поддающихся количественной оценке, например: условий строительства, перспектив развития района, оценки влияния на флору и фауну. В связи с ограниченностью финансовых и временных ресурсов сбор полной информации не всегда возможен, по ряду показателей могут быть даны лишь качественные оценки в виде высказываний экспертов. Необходима разработка процедур, позволяющих учесть неуверенность лица, принимающего решения, в отношении его ответов и дать оценку возможных отклонений оценок альтернатив в таких условиях.

3. Повышение точности расчётов.

Решение задач по вводу ветроэнергетических мощностей требует сбора большого количества исходной метеорологической информации и проведения многочисленных расчётов. Необходимо использовать современные возможности программного и аппаратного обеспечения для трёхмерного моделирования и аэродинамических расчётов на ЭВМ с целью повышения точности решений задач при вводе ветроэнергетических мощностей.

В соответствии с выбранными направлениями совершенствования была определена цель диссертационного исследования.

Цель исследования – совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе методов многокритериального анализа и аэродинамического моделирования.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующего методического обеспечения для принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей.
2. Развитие методики принятия решений по выбору районов и площадок размещения ВЭС на основе методов многокритериального анализа с возможностью учета неопределенности информации.
3. Совершенствование методики оценки ветроэнергетического потенциала района на основе аэродинамического моделирования.
4. Интеграция разработанных методик в виде системы поддержки принятия решений при вводе ветроэнергетических мощностей.
5. Оценка качества решений, принимаемых при вводе ветроэнергетических мощностей.

Методика исследований основана на теории и методах системного анализа, принятия решений, теории полезности, теории вероятностей, методов аэродинамического моделирования.

Объектом исследования является оценка эффективности ввода ветроэнергетических мощностей.

Предметом исследования являются методы многокритериального анализа и аэродинамического моделирования при оценке района и площадок для размещения ВЭС.

Научную новизну диссертации составляют:

1. Усовершенствованный подход проведения оценки эффективности применения ВЭС с использованием статистически необработанных данных метеостанций, учетом факторов воздействия на окружающую среду, влияния рельефа местности и реализованный в схемном решении.
2. Развитая методика многокритериального выбора районов и площадок для размещения ВЭС на основе методов многокритериальной теории

полезности MAUT (Multi-attribute utility theory) и методов группы SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique). Методика отличается: возможностью учёта неэкономических факторов (экологических, социальных и др.) при выборе района и площадки для размещения ВЭС; использованием двух методов для учета большого числа критериев; возможностью учета неопределенности условий развития района размещения ВЭС.

3. Методика оценки площадок для размещения ВЭС на основе методов аэродинамического моделирования, отличающаяся: наличием двух подходов к учёту результатов аэродинамического моделирования рельефа местности в принятии решения по выбору площадки; возможностью интегрирования результатов расчёта в многокритериальную оценку площадок для размещения ВЭС.

На защиту выносятся:

1. Усовершенствованная схема проведения исследований по оценке эффективности применения ВЭС с использованием статистически необработанных данных метеостанций, учетом факторов воздействия на окружающую среду и влияния рельефа местности.

2. Методика многокритериального выбора районов и площадок для размещения ВЭС на основе методов многокритериальной теории полезности MAUT и методов группы SMART.

3. Методика оценки площадок для размещения ВЭС на основе методов аэродинамического моделирования

В 2013 году **работа получила грантовую** поддержку на конкурсе «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») г. Иркутск, проект: «Программный комплекс системного анализа эффективности эксплуатации ветровых и солнечных установок».

Значение для теории заключается в развитии многокритериального подхода к обоснованию решений по выбору района и площадки для размещения ВЭС с учетом неопределенности предпочтений ЛПР, результатов аэродинамического моделирования.

Практическая значимость работы заключается в разработке модулей системы поддержки принятия решений (СППР) «Wind-MCA», повышающих точность оценки ветроэнергетического потенциала и реализующих методики многокритериального выбора района и площадок ВЭС на основе аэродинамического моделирования. Результаты позволяют повысить качество принимаемых решений, снизить загрузку ЛПР. Материалы диссертации используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» на кафедре Промышленной теплоэнергетики, при решении проектных задач ООО «БРИИЗ», ООО «СЭЛТЕХ», ООО «Братский Бензин», ООО «Сибирская пила».

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением математических методов, моделей и допущений. Выводы согласуются с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013», «Энергия-2016», г. Иваново; XLVI конференции научной молодежи «Системные исследования в энергетике», ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск, 2016 г.; Международном форуме молодых учёных «Наука будущего – наука молодых», г. Севастополь, 2015 г.; VII Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» г. Казань, 2012 г.; XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, 2011 г.; XLIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» г. Новосибирск, 2011г.; II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», г. Саратов, 2011 г.; XLVI Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», г. Хабаровск, 2015 г.; III Российской молодежной научной школы-конференции

«Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» г. Томск, 2015 г.; XII (XXXIV) Всероссийских научно-технических конференциях «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири», г. Братск, 2013-2016 гг.; Межвузовских научно-технических конференциях студентов и магистрантов «Молодая мысль – развитию энергетики», г. Братск, 2010 – 2011 гг.

В 2014 году получено **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind-MCA v.1.00)».

Личный вклад. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. В совместных публикациях вклад автора составляет от 40% до 60%, автору принадлежат результаты, связанные с постановкой задачи, разработкой методики многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС на основе методов MAUT и SMART; методики учета размытых предпочтений ЛПР в отношении ценности оценок по критериям. В СППР «Wind-MCA» с участием автора разработаны модули анализа ветроэнергетического потенциала, многокритериального анализа.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 научные статьи, из них 5 [12, 56, 207, 208, 209] – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ [210].

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка из 261 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 178 страниц, в тексте содержится 51 рисунок и 23 таблицы. В приложении приведены акты внедрения, свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ Wind-MCA, диплом победителя программы «УМНИК».

Во введении обосновывается актуальность исследований, направленных на совершенствование методического и программного обеспечения поддержки принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей, формулируются

цель и задачи для ее достижения; формулируются научная новизна, положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы; формулируются основные проблемы и недостатки существующего методического обеспечения для решения обозначенных задач; приводится краткая характеристика основных разделов диссертации.

В первой главе проводится анализ состояния, проблем и перспектив развития ветроэнергетики России. На основе анализа нормативных документов, научно-методических работ выделены задачи, возникающие при вводе ветроэнергетических мощностей, а также предложения, по совершенствованию их решения. Проведен обзор программных продуктов для анализа решений по вводу ветроэнергетических мощностей. Проведен обзор методов рационального выбора, сформулированы требования для их использования в задачах ввода ветроэнергетических мощностей. Выбраны наиболее эффективные методы с позиций сформулированных требований.

Во второй главе автором проводится разработка методического обеспечения для решения задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей:

1. Методики многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС на основе методов MAUT и методов группы SMART.

2. Методики принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок. Методика направлена на решение трудностей, возникающих у ЛПР при задании точных количественных значений ценности критериальных оценок.

3. Методики определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала, которая позволяет произвести анализ и выбор перспективных площадок для размещения ВЭС в районе. Основой методики является аэродинамическое моделирование ветрового потока с использованием трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района.

В третьей главе автором предлагается структура СППР для задач ввода ветроэнергетических мощностей. Рассматриваются особенности разработанной

в среде Delphi с участием автора СППР «Wind-MCA». Проводится исследование качества получаемых решений на основе предложенных автором трёх методик и программы для ЭВМ «Wind-MCA»:

1. Многокритериальный анализ и ранжирование районов размещения ВЭС в северных улусах республики Саха (Якутия).

Целью данного этапа было проведение многокритериального анализа и сравнение его результатов с результатами анализа по одному критерию – экономическому. При многокритериальном анализе учитывались: экономический, экологический, социальный критерии и критерий стабильности работы ВЭУ. При этом в результате было проведено численное ранжирование пунктов по многокритериальной перспективности размещения ВЭУ. Анализ показал, что экономический эффект применения ВЭУ остаётся наиболее важным, однако учёт неэкономических факторов вносит свои коррективы.

2. Многокритериальный анализ и ранжирование районов размещения ВЭС с учётом неопределённости ЛППР в отношении критериальных оценок.

Целью анализа был учёт неопределённости ЛППР в отношении критериальных оценок при ранжировании районов размещения ВЭС. При этом наблюдалось небольшое изменение ранжирования районов в сравнении с предыдущим анализом.

3. Аэродинамическое моделирование обтекания воздушным потоком рельефа местности в районе посёлка Аян, Хабаровского края. Многокритериальный анализ и выбор площадки для размещения ВЭС.

Целью данного этапа являлся многокритериальный выбор наиболее перспективной площадки для размещения ВЭС. На основании данных аэрокосмических съёмок была создана цифровая трёхмерная модель рельефа окрестностей посёлка Аян, учитываемая площадь порядка 10х10 км. Проведено аэродинамическое моделирование обтекания рельефа местности ветровым потоком с восьми направлений, соответствующих розе ветров. Выбраны наиболее перспективные площадки с учётом повторяемости скорости ветра. Далее выбраны наиболее перспективные площадки с учётом удобства

обслуживания и монтажа, а также минимизации воздействия на окружающую среду.

В заключение по диссертационной работе отмечается, что на основании проведенных исследований достигнута цель и решены задачи работы по созданию методического и программного обеспечения для поддержки принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей.

При этом получены следующие научные результаты:

1. Усовершенствована схема проведения исследований применения ВЭУ, отличающаяся формализованным подходом к учёту неэкономических факторов, использованием статистически необработанных метеоданных, данных геоинформационных систем для аэродинамического моделирования, данных о ВЭУ и потребителе.

2. Разработана методика поддержки принятия решений по выбору районов и площадок размещения ВЭС на основе методов многокритериального анализа MAUT и SMART. Применение методики позволяет более обоснованно подойти к анализу районов, поскольку в полученных многокритериальных оценках содержатся факторы, которые ранее не учитывались или учитывались неформализованно. Использование метода SMART позволяет снизить загрузку ЛПР при анализе субкритериев.

3. Усовершенствована методика многокритериального выбора альтернатив для условий неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок. Анализ с помощью данной методики позволяет выявить устойчивые к изменениям предпочтений ЛПР альтернативы, которые следует рассматривать как наиболее перспективные для дальнейших исследований, а также оценить влияние отклонений оценок ЛПР и оценок альтернативы по критерию на результаты анализа.

4. Разработана методика определения площадок с высоким ветроэнергетическим потенциалом на основе методов аэродинамического моделирования.

Применение данной методики позволяет существенно повысить точность технико-экономического анализа за счёт корректировки данных о скорости ветра с учетом влияния рельефа местности и выявить наиболее перспективные площадки, а также локальные зоны затиший.

5. Разработаны модули анализа ветроэнергетического потенциала и многокритериального анализа альтернатив в СППР «Wind-MCA».

7. Проведено исследование качества принимаемых решений с использованием разработанных методик на примере северных улусов республики Саха (Якутия) и района п. Аян Хабаровского края. Полученные решения являются более обоснованными, так как отвечают большему числу целей и требований.

1. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ

1.1. Анализ состояния, проблем и перспектив ветроэнергетики в России

Ветроэнергетика является одним из наиболее быстро развивающихся направлений возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современном мире. С 2001 по 2018 года установленная мощность ветровых электростанций (ВЭС) в мире увеличилась более чем в 24,6 раз: с 24 ГВт до 591 ГВт, из которых 51,3 ГВт было введено за 2018 год. Лидерами по установленной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) в течение нескольких лет являются: Китай – 206,8 ГВт; США – 96,6 ГВт, Германия – 53,18 ГВт, Индия – 35,12 ГВт [49, 132, 138, 199, 220, 225, 232, 245, 246, 253, 255, 256, 258, 259].

Согласно основным сценариям развития ветроэнергетики в мире «Wind energy scenarios for 2020», «45% by 2030» [15, 124, 138, 217, 255, 260, 261], ветровая энергетика будет обеспечивать 5% мирового производства электроэнергии к 2030 году с ростом до 6,6% к 2050 году. При этом к 2020 году общая установленная мощность ВЭУ в мире увеличится на 60% по сравнению с 2013 г. Столь быстрому внедрению новых мощностей ВЭУ способствует ряд факторов:

1. Желание повысить энергоне­зависимость стран [217, 222, 225, 242, 253, 254, 261].
2. Стремление снизить антропогенное воздействие на окружающую среду [1, 26, 29, 119].
3. Невысокий и постоянно снижающийся уровень себестоимости производимой электроэнергии на ВЭУ в сравнении с другими видами ВИЭ [17, 59, 217, 226, 245].

Стимулирование развития ветроэнергетики осуществляется с помощью прямой финансовой поддержки со стороны государств, совершенствованием и развитием поддержки на законодательной основе, политическими акциями,

движениями. Основными формами стимулирования развития ветроэнергетики и ВИЭ в целом, в области производства электроэнергии, являются [47, 79, 158, 165, 199,217]:

1. FIT- тарифы (feed-in tariffs).
2. RPS – стандарты (renewable portfolio standards).
3. Инвестиционный налоговый кредит (investment tax credit).
4. Зелёные сертификаты (tradable green certificates – TGCs).

Основная суть этих мер заключается в создании финансовой поддержки: повышенными фиксированными тарифами на продажу электроэнергии от источников ВИЭ, налоговыми льготами для производителей энергии, определение гарантированных объёмов поставок электроэнергии с помощью ВИЭ.

Несмотря на глобальную тенденцию динамичного увеличения количества устанавливаемых ВЭУ в мире, темпы развития ветроэнергетики в России достаточно низки. К середине 2018 г. суммарная установленная мощность ВЭС, в России составляла 183,9 МВт [232].

Основными препятствиями на пути реализации проектов ВЭС в России являются:

1. Большое количество имеющихся традиционных энергоресурсов в стране – нефти, газа, угля, гидроресурсов.

По своему природному потенциалу Россия занимает ведущее место в мире [97]. Отмечается, что на территории России сосредоточено 12% разведанных запасов нефти, 34% запасов природного газа, около 20% разведанных запасов каменного и 32% запасов бурого угля. На данном этапе развития углеводородные виды топлива являются основой российского топливно-энергетического комплекса. Тепловые электростанции (ТЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), атомные электростанции (АЭС) обеспечивают централизованное энергоснабжение для подавляющего количества потребителей. Существующий уровень тарифов не позволяет ВЭУ конкурировать в зонах централизованного электроснабжения. Поэтому опорой

современной электроэнергетики России являются электростанции, основанные на традиционных видах топлива.

2. Специфика ВЭУ как источника электроэнергии.

Ввиду стохастического характера ветра и сравнительно малой мощности на единицу площади, ВЭУ не могут обеспечить полноценной замены ТЭС, ГЭС, АЭС. Поэтому лишь в редких случаях, при отсутствии других энергоресурсов, ВЭУ может являться основным источником. Совместное использование ВЭС в локальных энергоузлах возможно лишь с маневренными источниками: дизельными электростанциями (ДЭС), гидроаккумулирующими электростанциями, газотурбинными установками и др. Обладающие существенной инерционностью ТЭС и АЭС не могут оперативно изменять свою мощность при колебаниях выработки ВЭС.

Одно из наиболее рациональных направлений – использование ВЭУ в качестве дополнительного источника энергии совместно с ДЭС в условиях децентрализованного энергоснабжения. В этом случае за счёт ВЭУ возможна экономия горюче-смазочных материалов (ГСМ), затрачиваемых при работе ДЭС. При этом ДЭС является основным источником энергии, а рекомендуемая мощность ВЭС для стабильной работы ветродизельного комплекса не должна превышать третьей части мощности ДЭС [2, 39, 51, 60, 66, 73, 84, 107, 171].

3. Недостаточная поддержка со стороны государства.

Существует ряд законодательных документов: федеральных законов и подзаконных актов в виде постановлений и распоряжений Правительства РФ [149, 194, 195, 221], которые регламентируют использование ВИЭ, выход на энергетический рынок, определяют механизмы поддержки ВИЭ. Однако их форма поддержки, в большинстве случаев, является преимущественно формальной. Не регламентировано и не установлено большинство процедур и условий выхода на рынок производителей ВИЭ [33, 59, 62, 79, 101, 118, 131, 139, 214]. С учётом опыта предыдущих лет в Энергетической стратегии России на период до 2035 прогноз повышения мощности выработки электроэнергии от ВИЭ понижается от 4,5% к 2030 году «до 3,7% в общем объеме ввода

мощностей электростанций, а в производстве электроэнергии – до 2,2% от общего объема выработки» к 2035 году. Несмотря на понижение до 3,7%, объем предстоящего ввода ветроэнергетических мощностей все еще очень значительный – порядка 8,5 ГВт.

Также, в проекте Энергетической стратегии России на период до 2035 года, отмечаются основные проблемы в области возобновляемой энергетики, связанные с: отсутствием действующих механизмов государственного стимулирования развития ВИЭ; недостаточными инвестициями в развитие перспективных технологий; необходимостью разработок и внедрением механизмов формирования спроса на установки и оборудование возобновляемой энергетики; нехваткой инженерных и научных кадров; недостаточным финансированием научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; недостаточной информационной поддержкой.

4. Недостаточная проработка процедур учёта экологических и социальных эффектов при сравнении традиционных и возобновляемых источников энергии [101].

Одним из преимуществ ветроэнергетики является её меньшее антропогенное воздействие на окружающую среду по сравнению с ГЭС, ТЭС и АЭС. При сравнении вариантов развития энергоснабжения районов большинство процедур анализа сводятся к экономической оценке негативных воздействий станций. При этом не все воздействия могут быть оценены в рублях, например отношение жителей к возможным авариям на АЭС, повышение смертности и заболеваемости из-за вредных воздействий ТЭС, экологические последствия затопления водохранилища ГЭС. В этой связи при сравнении проектов ВЭС с проектами традиционных станций имеет место недооценка эффектов ветроэнергетических мощностей.

Таким образом, в настоящее время существует ряд сдерживающих факторов развития ветроэнергетики в России, но существуют также и весомые факторы для ее активного внедрения. Проведем их обзор.

1. Высокий ветроэнергетический потенциал.

Россия имеет значительные ресурсы ветровой энергии [14, 16, 50, 117], которые в силу большой площади и протяжённости страны распределены достаточно неравномерно (рис. 1.1).

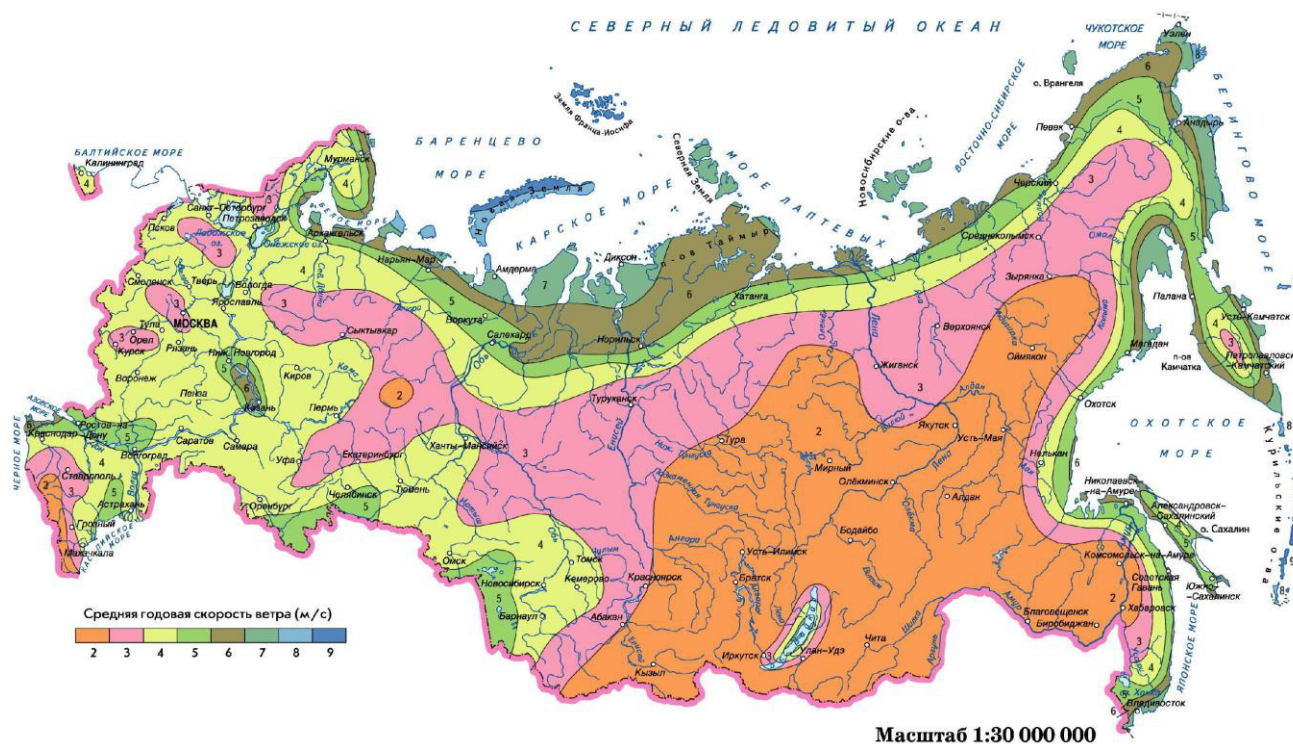


Рис. 1.1. Среднегодовые скорости ветра в России

В России в 2007–2008 годах были проведены уточненные исследования ветроэнергетического потенциала [14, 16, 50], которые показали, что общий технический потенциал ветровой энергии России на высоте 100 м составляет около 14000 ТВт·ч в год. Общий экономический потенциал ветровой энергии, определенный для современных экономических условий хозяйствования, составляет около 70 ТВт·ч в год, то есть около 30% производства электроэнергии всеми электростанциями России. Сравнение ветроэнергетического потенциала в мире и в России представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Ресурсы ветроэнергетики в мире и в России

Теоретические ресурсы ветроэнергетики, млн. т.у.т.		Технические ресурсы ветроэнергетики, млн. т.у.т.	
в мире	в России	в мире	в России
$2,0 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$

Примерно 30% экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, 14% – в Северном экономическом районе, около 16% – в Западной и Восточной Сибири. В 2010 году было выполнено территориальное районирование России по значениям удельной мощности ветрового потока на высоте 100 м над поверхностью земли [50], показавшее, что наиболее высокий потенциал ветровой энергии ($500\text{--}800 \text{ Вт/м}^2$) наблюдается в северных и дальневосточных регионах России.

Даже с учётом средних показателей ветроэнергетического потенциала в континентальной части, актуальности и обоснованию использования ВЭС в России было посвящено множество работ [35-47, 49-53, 55-58]. Ведущиеся в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН исследования показывают экономическую целесообразность использования ВИЭ в удаленных и труднодоступных районах [63, 77, 133, 155, 163].

2. Необходимость повышения эффективности децентрализованного электроснабжения.

Одной из характерных особенностей существующего энергоснабжения потребителей в России является достаточно большая площадь, находящаяся в зоне децентрализованного электроснабжения, – порядка 12 млн. км^2 , что составляет 70% территории страны. На этих территориях проживает 25 млн. жителей – 18% населения страны [214, 97]. Электроснабжение этой территории осуществляется преимущественно от ДЭС, доставка топлива для которых представляет сложный и многозвенный процесс, что отражается на себестоимости производства электроэнергии [84].

Использование ВИЭ отмечается в качестве одного из перспективных направлений развития энергоснабжения децентрализованных потребителей [97].

Использование ВЭУ в комплексе с ДЭС [2, 39, 51, 60, 66, 83, 107, 114, 171] позволяет решить сразу несколько задач:

- повысить надежность электроснабжения потребителей;
- уменьшить себестоимость производимой энергии для потребителя;
- уменьшить объёмы резервного топлива;
- уменьшить объёмы завозимых нефтепродуктов.

Например, анализ эффективности использования ВЭУ в республике Саха (Якутия) [8, 56, 73, 84, 155, 205, 206, 209, 211], показал, что ветроэнергетический потенциал северных территорий республики Саха (Якутия) и существующие экономические условия достаточны для эффективного использования ВЭУ в отдельных районах. Так, при сохранении существующих темпов роста на дизельное топливо, могут быть экономически эффективными проекты использования ВЭУ в пунктах: Тикси, Усть-Оленёк, Найба, Юрунг-Хая, Быков мыс, Саскылах, Чокурдах, Таймылыр [56, 205, 206, 209, 211].

3. Проблема износа оборудования.

Значительная часть энергетического оборудования, используемого на отечественных ДЭС, находится в эксплуатации уже более 35 лет и требует замены [28, 73, 84, 148, 214]. Последствиями износа оборудования является рост количества аварий на предприятиях, понижение КПД энергоустановок. Например, более 60% линий электропередачи в Якутии, трансформаторных подстанций отработали свой ресурс и требуют капитального ремонта, вследствие чего происходит периодическое аварийное отключение электросети, опасное для жизни в длительный зимний период [84].

Основным решением этой проблемы является модернизация и обновление энергетического оборудования. Совместно с этим процессом можно

предложить эффективные схемы работы ветродизельных комплексов, преимущества которых выше кратко описаны в п. 2.

4. Проблема энергоснабжения туристско-рекреационных зон.

Россия обладает богатой, уникальной природой: порядка 43-х национальных парков, 103-х заповедников, 73-х заказников. С учётом федерального закона «Об особо охраняемых природных территориях» [197] этим объектам уделяется особое внимание по охране флоры и фауны. Для сохранения природного баланса, минимизации антропогенного воздействия на этих территориях, сохранения эстетической привлекательности возможно применение ВЭУ в комплексе с уже имеющимися источниками энергии.

Таким образом, несмотря на определённые трудности с развитием ветроэнергетики в России на данном этапе, для её становления есть достаточный ветроэнергетический потенциал, ниша её эффективного применения, а также технологические, экологические и социальные предпосылки.

Рассматривая зарубежный опыт развития ветроэнергетики, можно убедиться в том, что ветроэнергетика является важной частью в электроэнергетике, а касаясь России, при соответствующей государственной поддержке, ветроэнергетика способна стать конкурентоспособной уже в ближайшей перспективе.

Роль ВИЭ в энергобалансе страны отмечается в проекте Энергетической стратегии на период до 2035 года следующими стратегическими целями [195, 221]:

- 1) снижение темпов роста общего объёма потребления органического топлива, сохранение его запасов для будущих поколений;
- 2) диверсификация топливно–энергетических балансов и повышение уровня энергетической безопасности и надёжности энергоснабжения субъектов Российской Федерации и России в целом;

3) снижение затрат на передачу и распределение электрической и тепловой энергии, а также транспортировку топлива и снижение возникающих при этом потерь;

4) достижение комфортных условий труда и быта населения, надежного энергоснабжения предприятий местной промышленности, прежде всего в удаленных и труднодоступных районах, не подключенных к сетям общего пользования;

5) преодоление отставания от мирового уровня в производстве наукоемкого и высокотехнологичного оборудования для возобновляемой энергетики;

6) снижение объема эмиссии парниковых газов и вредных выбросов при производстве электрической и тепловой энергии.

В 2013 году была утверждена Правительством Схема территориального планирования РФ в области энергетики, согласно которой к 2025 году планируется введение 1030 МВт мощностей ВЭС, а к 2030 году – 6060 МВт [146].

Таким образом, в ближайшей перспективе следует ожидать значительных объемов ввода генерирующих мощностей на основе энергии ветра. Предстоит решить комплекс задач по их эффективному внедрению.

1.2 Задачи, возникающие при развитии генерирующих мощностей с использованием энергии ветра

Развитие генерирующих мощностей на основе ВИЭ должно согласовываться с общей стратегией развития электроэнергетической системы (ЭЭС). При проектировании развития ЭЭС в соответствии с признаками иерархического деления [4, 13, 31] выделяют задачи, представленные на рис. 1.2. Все задачи связаны по горизонтали и вертикали взаимно согласованными потоками информации. Для получения оптимального варианта

развития ЭЭС проводится многократная оптимизация решений совокупности задач [4].

Проблемы	Задачи			
	Схема развития энергетики страны на перспективу 15-20 лет	Схема развития ЭЭС и ОЭС на 10-15 лет	Схема развития РЭС на 5-10 лет	Схема развития распределительных сетей на 5 лет
Оптимизация общенергетической системы	Задачи оптимизации общенергетической системы			
	Определение оптимальной структуры генерирующих мощностей по видам энергоресурсов и типам электростанций	...	...	
Определение структуры генерирующих мощностей	Уточнение оптимальной структуры генерирующих мощностей по типам электростанций и параметрам основного оборудования	...	...	
Оптимизация развития генерирующих станций	Обоснование оптимальных принципов развития и размещения электростанций	Выбор оптимальных параметров новых типов генерирующего и электротех. оборудования		
	Обоснование решений по выбору типа, пунктов размещения, мощности и срокам проектирования электростанций		Обоснование параметров агрегатов электростанций, сроков их сооружения и ввода	
Оптимизация развития	Задачи оптимизации развития электрических сетей			

Рис. 1.2. Проблемы и задачи, возникающие при проектировании развития ЭЭС

Анализ иерархии, нормативных документов и научно-методической литературы [4, 13, 17, 31, 73, 84, 85, 98, 154] позволил выделить основные задачи, возникающие при вводе ветроэнергетических мощностей (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Основные задачи, возникающие на этапах реализации проектов ввода в эксплуатацию ВЭС

Рассмотрим более подробно каждую задачу.

I. Выбор района для ввода ветроэнергетических мощностей.

Данная задача (рис. 1.3) может возникать при реализации энергетической стратегии России по развитию генерирующих мощностей на основе ВИЭ, при разработке и реализации энергетических стратегий субъектов Российской Федерации [220], стратегий социально-экономического развития субъектов Российской Федерации [187, 220]. Кроме того, задача может возникать на предынвестиционной фазе [192] у инвесторов, заказчиков проектов при анализе районов возможного строительства ВЭС.

Альтернативами $A_1, A_2, \dots, A_n$ (рис. 1.3) являются районы – территории с выявленным энергодефицитом [133, 206]. В зависимости от масштаба планируемого ввода мощности, альтернативами могут являться: города, посёлки, деревни, объекты транспортной, промышленной инфраструктуры и др.

От правильного выбора района зависят стоимость и сроки строительства, размеры эксплуатационных затрат, экономическая эффективность капитальных вложений. Последняя служит условием вложения частных инвестиций – одной из главных целей реформирования российской энергетики [218].

Помимо экономических аспектов, при выборе района необходимо учитывать социальные факторы, факторы окружающей среды, здоровья и безопасности населения. Каждый район обладает уникальными особенностями, которые необходимо учитывать при принятии решений по вводу генерирующих мощностей. Усложняет задачу необходимость долгосрочного (не менее 15 лет) прогноза развития районов.

II. Оценка эффективности использования ВЭС в районе для выбора типа электростанции в районе.

Данная задача возникает после выбора района для ввода новых мощностей. Как правило, ВЭС является одним из возможных вариантов решений энергоснабжения, поэтому на данном этапе формируется перечень альтернатив – различных источников энергоснабжения I_i^{Ai} района A_i . Для

каждого вида источника энергии проводится сравнительный анализ, выполняемый соответствующими специалистами.

Так, согласно методике ИСЭМ СО РАН [169] эта задача имеет локальный уровень, на котором рассматривается конкретный пункт с известными климатическими и метеорологическими характеристиками и заданной потребностью в конечной энергии (как правило, электрической и тепловой). Здесь требуется оценить конкурентоспособность ВИЭ с традиционными энергоисточниками, выбрать их тип и установленную мощность [85, 87, 89, 91, 92, 94- 96, 170].

III. Выбор моделей, количества и мощности ВЭУ.

Данная задача возникает после выбора района, а также принятия решения об эффективности строительства ВЭС. Целью является выбор модели ВЭУ, ее технических характеристик, количества и единичной мощности.

Конкретизация района, вида электростанции на этапах I, II позволяет уточнить исходную информацию для более детального решения задачи на III этапе. При выборе модели ВЭУ определяющим является критерий экономической эффективности. В то же время, необходимо учитывать и неэкономические факторы: принятие решений в пользу большого количества ВЭУ малой мощности приводит к изъятию большой площади земель, выбор большой единичной мощности приводит к росту диаметра ветроколеса и башни, что повышает угрозу для птиц.

В рамках задачи более детально прорабатываются:

- данные о скорости ветра в районе. Важен учёт количества и длительности энергетических затиший;
- график электрических и тепловых нагрузок, их суточные и сезонные колебания;
- технико-экономические параметры ВЭУ: мощностная характеристика, высота установки ротора, климатическое исполнение ВЭУ, стоимость ВЭУ.

IV. Выбор площадки для ВЭС.

Данная задача возникает после определения основных параметров ВЭС, решается заказчиком-застройщиком [220]. Как правило, в районе могут быть определены десятки потенциально пригодных площадок. При решении этой задачи важно комплексно учитывать следующие критерии:

1. Скорость ветра. С учётом влияния рельефа местности в данной локальной области возможны как повышения, так и понижения скорости ветра по сравнению с фоновой.

2. Площадь. При большей площади, возможно установить большее количество ВЭУ.

3. Удалённость от центра электрических нагрузок характеризует затраты на передачу энергии потребителям, а также соблюдение санитарных норм по показателям шума.

4. Удобство монтажа и эксплуатации ВЭУ на данной площадке.

5. Статус земельных участков. Ценность данных земель в качестве природной зоны или для сельскохозяйственных нужд.

6. Наличие путей миграции животных и птиц непосредственно вблизи площадки.

V. Разработка электрической схемы проекта и выбор состава оборудования.

Целью данного этапа является разработка всей электрической схемы проекта с выбором электрооборудования: контроллеров, инверторов, кабелей, коммутационных аппаратов, проектирование трасс прокладки кабельных или воздушных линий, разработка строительной документации.

Данный этап является заключительным перед началом строительно-монтажных работ. Выполняется инжиниринговой компанией [192].

Данная задача является наиболее формализованной, ее этапы имеют проработанное методическое обеспечение, позволяющее с технико-экономических позиций провести выбор основного и вспомогательного оборудования.

Таким образом, при вводе новых ветроэнергетических мощностей можно выделить пять основных задач. Первые четыре задачи имеют усложняющие признаки системных проблем, такие как слабую структурированность, многокритериальность, неоднозначность, конфликтность [121].

Рассмотрим методическую и нормативную базу, обеспечивающую руководства, требования, нормы в решении обозначенных задач, возникающих при реализации проектов в ветроэнергетике.

1.3. Анализ методической и нормативной базы для решения задач ввода ветроэнергетических мощностей

Основные нормативные и методические документы, определяющие требования и рекомендации в области ветроэнергетики:

- государственные стандарты [34-38], в которых раскрываются основные определения в ветроэнергетике, требования к техническим характеристикам ВЭУ, требования к качеству электроэнергии от ВЭУ, требования по безопасности, уровню шума и др.

- методические указания [98, 154, 156, 170], в которых предлагаются рекомендации по оценке ветроэнергетического потенциала и эффективности инвестиционных проектов.

- методические указания и научно-методическая литература по расчётам и проектированию фундаментов ВЭУ [52-54, 99, 100], а также СНиП по сооружению, проектированию зданий и конструкций [172-183].

- модели экономической целесообразности применения ВИЭ. В ИСЭМ СО РАН разработан ряд имитационных моделей для оценки экономической целесообразности применения различных вариантов ВИЭ [169]. Модели позволяют рассчитывать различные режимы работы ВИЭ в зависимости от типа энергоисточника и числа часов использования установленной мощности [63].

В рассмотренных источниках предоставляется информация по общему руководству в решении обозначенных задач (рис. 1.3). Рассмотрим предметно методическое обеспечение для сформулированных задач (рис 1.3), и выделим проблемы, с которыми сталкивается исследователь, при их решении.

Для решения задач I и II (рис. 1) может применяться разработанная в ИСЭМ СО РАН [169] схема, представленная на рис. 1.4. Её центральный блок – «определение условий эффективности вариантов энергоснабжения» позволяет найти наиболее целесообразный способ питания потребителей. Так, могут быть оценены районы для ввода в них ветроэнергетических мощностей, а также оценена эффективность их ввода по сравнению с другими источниками энергии или централизованным электроснабжением.

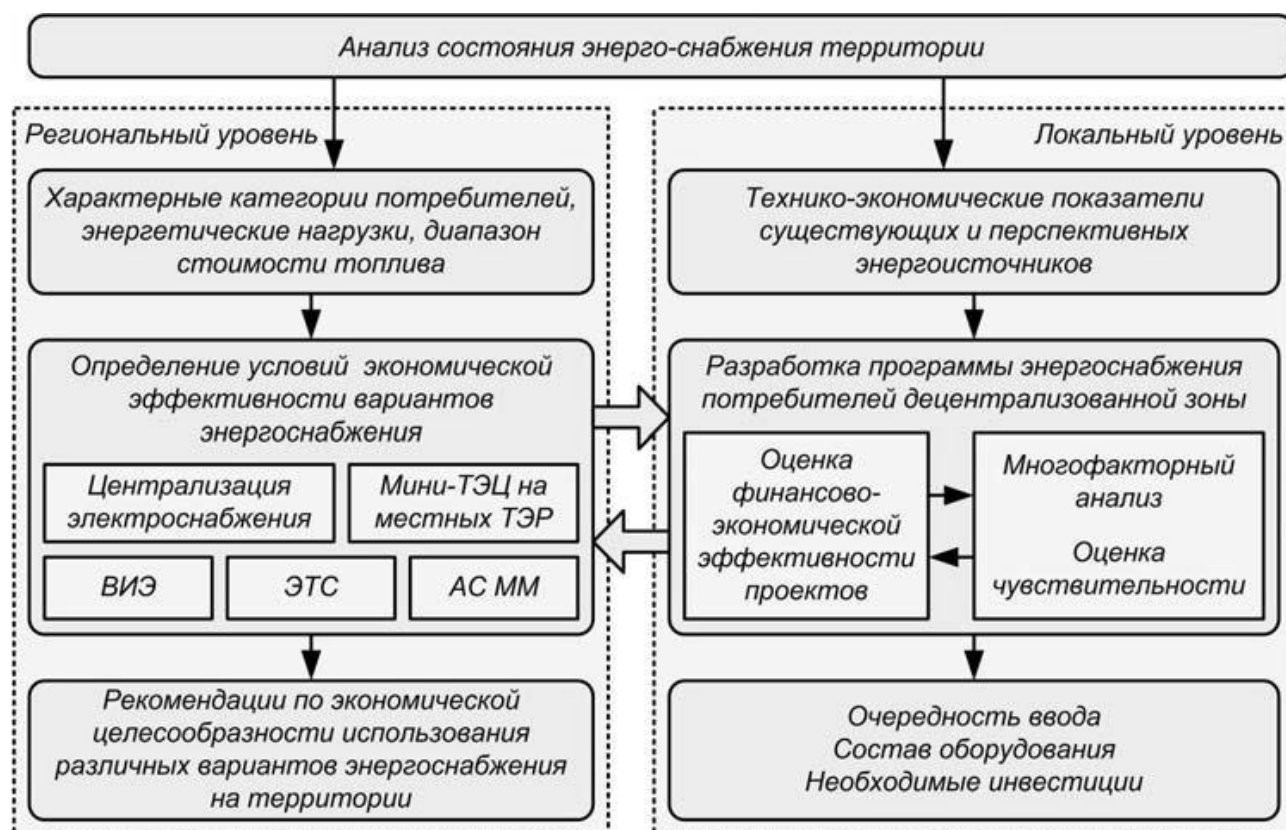


Рис. 1.4. Схема исследований по выбору рациональных вариантов энергоснабжения децентрализованных потребителей

Для оценки эффективности ввода ветроэнергетических мощностей в ИСЭМ СО РАН разработана схема проведения исследований по оценке экономической эффективности применения ВЭУ (рис. 1.5) [63, 77, 101, 133,

163, 169]. Для удобства описания схема разделена автором на три основных блока: 1 – формирование исходных данных; 2 – определение востребованной выработки электроэнергии; 3 – определение экономической эффективности применения ВЭУ.

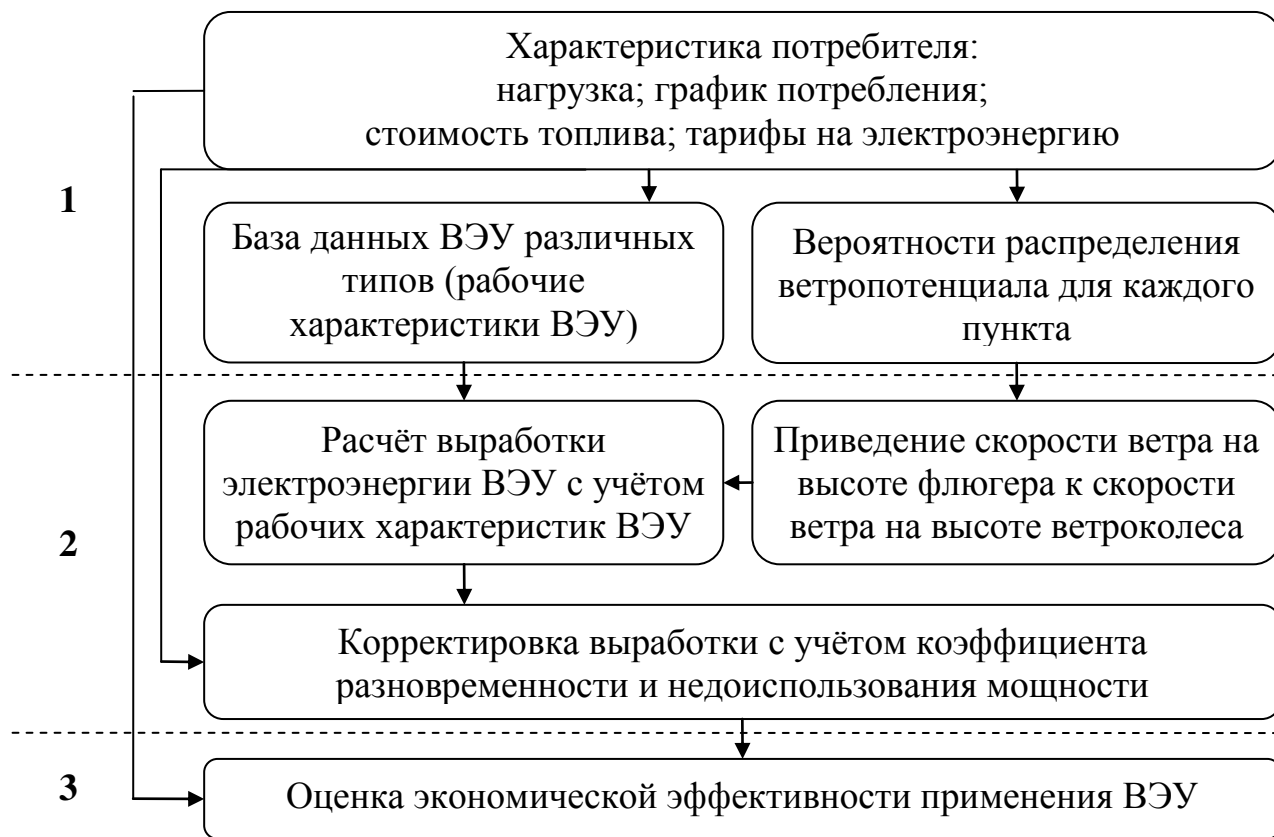


Рис. 1.5. Схема проведения исследований по оценке экономической эффективности применения ВЭУ

Рассмотрим подробнее первый блок, в котором формируются исходные данные для исследований.

Для оценки ветроэнергетического потенциала большинство расчётов [23, 44, 45, 47, 100, 127, 154 204, 215] основывается на данных статистических и вероятностных показателей (распределений Вейбулла и др.), которые отражают характеристики ветрового потока верно лишь в течение большого промежутка времени – года или нескольких лет. Но при использовании таких данных нет возможности корректно оценить характеристики ветра внутри определенного временного интервала, например, выявить закономерности изменения скорости ветра и его направления в течение суток, сезона. Затруднен анализ

длительности периодов энергетических затиший. Существенным недостатком использования статистически обработанных данных [186] является широкий интервал оценки скорости ветра, например вероятности повторения скорости ветра для определённого часа в определённом месяце указаны для значений скорости ветра от 2 до 5 и т.д. [186], что является достаточно грубым приближением. Ещё одним недостатком в национальном кадастре ветроэнергетических ресурсов [117] признаётся то положение, что не существует универсальной функции распределения ветра по скоростям для всех сезонов года и регионов России. А значит, что для каждого региона определение этой функции требует индивидуального подхода, учитывающего местные ветроклиматические условия, свойства рельефа и подстилающей поверхности в регионе, открытость метеорологической станции и флюгера (анемометра) и пр. Этот же вывод ранее был озвучен М.Е. Подтягиным [142]: «Нет никаких сомнений, что не только кривая Гаусса не может служить общим законом повторяемости ветров, универсальной кривой распределения скоростей ветров, но и что вообще такого общего закона, такой универсальной кривой (безусловно, «скошенной») нельзя создать без недопустимого искажения действительности».

Все перечисленные особенности анализа снижают точность оценки востребованной мощности ВЭУ, необходимой емкости аккумулирующих устройств.

Перейдем к процедуре формирования базы данных ВЭУ (блок 1, рис. 1.5). Наиболее распространенным способом учета зависимости выработки ВЭУ от скорости ветра является использование расчётных формул [3, 67, 185]. Например, для расчёта выработки мощности ВЭУ используют общеизвестную формулу [24, 55, 75, 104, 113, 137, 190, 200, 216]:

$$N_{\text{ВЭУ}} = 0,5 \cdot \rho \cdot F_{\text{БК}} \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{ВЭУ}}, \quad (1.1)$$

где ρ - плотность воздуха: 1,226 кг/м³; $F_{\text{БК}}$ – площадь ветроколеса, м²; v – скорость ветра на высоте установки ротора ВЭУ, м/с; $\eta_{\text{ВЭУ}}$ - КПД ВЭУ при данной скорости ветра.

Такой подход существенно снижает точность расчетов, поскольку, у каждой ВЭУ есть индивидуальная мощностная характеристика, которая показывает выработку мощности при определённой скорости. Данная характеристика может значительно отличаться от той, которая будет получена по формуле.

Во втором блоке (рис. 1.5) проводится расчёт востребованной энергии на основании рабочих характеристик ВЭУ и коэффициента разновременности. Коэффициент разновременности отражает наложение случайного характера выработки энергии ВЭУ с графиком нагрузки потребителя [77, 101, 133, 163]. Несмотря на важность, точный учёт нагрузок практически не освещается в методической литературе за исключением редких примеров [73, 84].

В третьем блоке (рис. 1.5) определяют экономическую эффективность проекта. Как правило, суть экономического эффекта использования ВЭС заключается в экономии горючесмазочных материалов (ГСМ) при совместной работе с ДЭС. Также экономический эффект от применения ВЭУ рассчитывают с учётом себестоимости производимой электроэнергии в сравнении с другими типами станций. По мнению автора блок экономического анализа достаточно хорошо проработан и отражен во многих работах [13, 17, 31, 56, 73, 84, 98, 101, 171, 211, 218].

Таким образом, существует ряд направлений совершенствования методического обеспечения оценки экономической эффективности применения ВЭС. Кроме того, помимо экономического аспекта, необходим учёт неэкономических критериев при принятии решения об эффективности использования ВЭС в районе. Для совершенствования существующей методики по отмеченным направлениям автор предлагает следующую схему проведения исследований (рис. 1.6). Жирным шрифтом выделены предлагаемые автором новые блоки или составляющие блоков, в сравнении со схемой на рис. 1.5. Схема также разделена на три блока, соответствующих блокам на рис. 1.5.



Рис. 1. 6. Схема проведения исследований по оценке многокритериальной эффективности применения ВЭУ

В первом блоке предлагается несколько позиций. Во-первых, на схеме исходные данные разделены на три категории в соответствии с их принадлежностью: данные о потребителе, данные о ВЭС и ДЭС, метеоданные и данные геоинформационных систем (ГИС). Структуризация исходных данных позволяет нагляднее и удобнее работать с информацией, например, в программной реализации схемы исследований при сравнительном анализе районов, моделей ВЭС или потребителей.

При составлении массива данных о потребителе, автором предлагается:

1. Использовать характерные суточные графики нагрузки потребителя с учетом сезонных изменений, а не проводить приближенных оценок с помощью коэффициента разновременности.
2. Учитывать данные об экологическом и социальном эффекте применения ВЭУ.

Возможно использование различных категорий данных, состав которых, в конечном итоге, определит лицо, принимающее решение: площадь и ценность земель, отводящихся под строительство ВЭС; динамика оттока/притока населения в районе установке ВЭС; удобство обслуживания и монтажа ВЭС и др.

При составлении массива данных о ВЭУ и ДЭС необходимо учитывать мощностную характеристику ВЭУ из ее паспортных данных. Это важный параметр для повышения точности расчёта выработки энергии ВЭУ.

Отдельной категорией выделен массив метеоданных и данных ГИС, где автором дополнительно предлагается:

1. Использовать статистически необработанные архивы многолетних наблюдений метеостанций за скоростью ветра [5].

Эффективность использования статистически необработанных данных в определении ветроэнергетического потенциала района и выработки электроэнергии ВЭУ показана автором в работах [5, 10, 56, 209]. Наиболее

существенные преимущества использования необработанных данных следующие:

- возможность работы с исходным массивом информации и получение всей необходимой статистической информации, которой может не быть в справочниках;

- более высокая точность расчёта выработки электроэнергии ВЭУ относительно небольших промежутков времени – месяц, день.

- возможность непосредственного сопоставления суточного графика нагрузок потребителя и выработки ВЭУ при определении востребованной энергии.

Вместе с тем, существуют и определенные трудности использования статистически необработанных данных метеостанций:

- необходимость обработки большого массива информации обуславливает необходимость в специалисте, который сможет автоматизировать процесс анализа в программе для ЭВМ;

- небольшой срок данных – как правило, цифровой массив необработанных метеорологических данных имеет промежуток от 4 до 15 лет. Однако в рекомендациях для инженерных расчётов достаточно 10-11 лет наблюдений [40, 57, 103, 106].

2. Использовать информацию о розе ветров.

Роза ветров имеет важное влияние при определении площадок для размещения ВЭС. Скорость ветра существенным образом зависит от рельефа местности и направления ветра.

3. Использовать трёхмерную модель рельефа местности.

Для определения как технико-экономической эффективности применения ВЭУ в районе, так и определения наиболее перспективных площадок автором выдвигается предложение детального учёта влияния рельефа местности. Рельеф местности может существенным образом оказывать влияние на скорость ветрового потока в локальных областях. С учётом кубической зависимости

выработки электроэнергии ВЭУ от скорости ветра влияние рельефа местности может быть достаточно большим [168, 193].

Таким образом, расчёт востребованной энергии проводится более точно с использованием:

- архива измерений с метеостанции, проводимых 4 - 6 раз в сутки;
- мощностной характеристики ВЭУ;
- суточных графиков электрических нагрузок с учетом сезонных изменений.
- информации о розе ветров и трехмерной модели рельефа местности.

Основная задача **второго блока** – расчёт востребованной энергии, вырабатываемой ВЭУ. Благодаря использованию предлагаемых автором исходных данных (блок № 1) анализ в данном блоке может существенно уточниться.

В третьем блоке добавлены процедуры многокритериальной оценки эффективности применения ВЭС. Эти процедуры могут применяться при выборе района или площадки для размещения ВЭС.

Выбор района и площадки размещения ВЭС достаточно многоаспектная задача, решение которой трудно свести лишь к технико-экономическим расчётам [13, 134, 192, 217]. ВЭС характеризуется целым рядом экологических воздействий, отличных от воздействий электростанций на органическом топливе, поэтому учёт экологического фактора является важной частью анализа. При строительстве и эксплуатации ВЭС, так или иначе, оказывается влияние на общество в различных сферах, поэтому учёт проекта с точки зрения социальной эффективности также необходим.

Далее отметим задачи, не включённые в схему проведения исследований (рис. 1.5), но отмеченные автором в схеме на рис. 1.3.

После выбора районов и оценки их эффективности стоит задача выбора моделей, количества и мощности ВЭУ (задача III, рис. 1.3). Методическое обеспечение этой задачи достаточно хорошо развито и включает базовые

методики оценки экономической эффективности проектов. Некоторые из аспектов выбора, в том числе экономичность и надёжность, рассмотрены в работах разных авторов [21, 69, 73, 84]. Однако совершенствования, предлагаемые автором, по повышению точности расчёта относятся и к решению данной задачи. Здесь также уместно применять для расчёта данные метеостанций, суточные графики нагрузки, мощностные характеристики и т.д.

Следующей задачей автор выделяет задачу выбора площадки для размещения ВЭС (задача IV, рис. 1.5). Эта задача также имеет несколько влияющих факторов. Одним из самых существенных факторов является скорость ветра. Важно учесть, что скорость ветра в локальных местах района может существенно отличаться от данных по архивам метеостанций вследствие эффекта струйных течений [156, 168, 193].

В научно-методической и нормативной литературе [168, 193] рекомендуют руководствоваться следующими критериями при выборе площадок:

- незатенённость территории;
- допустимые уровни шума;
- статус земельных участков;
- удобство монтажа и обслуживания;
- минимизация затрат на передачу электроэнергии.

В методической литературе [154, 156, 185] учёт влияния рельефа местности на скорость ветрового потока предлагается следующими способами:

- определением класса открытости площадки и корректировки её с учётом класса открытости метеостанции, на основании данных которой проводился анализ ветроэнергетического потенциала. Классификация В.Ю. Милевского принята в справочнике [185] и характеризует степень открытости флюгера (измерительного прибора) ветровому потоку по каждому румбу направлений.

Однако данная корректировка дает лишь приблизительную точность результатов, не отражая детальной картины распределения скорости ветрового потока на местности.

- обобщёнными рекомендациями по удалению ВЭУ от ближайших застроек, лесонасаждений. Рекомендации оперируют соотношениями высоты препятствия и его расстояния до желательного размещения ВЭУ. Обобщённые рекомендации также не отражают детальную картину распределения скорости ветрового потока особенно в условиях сложного рельефа.

- проведением натурных замеров скорости ветра на определённых площадках в течение длительного срока – не менее одного года [154]. Подобные исследования имеют лишь точечный характер получаемых данных - судить о скорости ветра можно лишь в конкретных точках, где установлены анемометры, соответственно для выбора из большого количества площадок необходимо поставить сеть анемометров. Недостатком таких исследований являются затраты временных, трудовых и финансовых ресурсов.

Используя современные информационные и программные средства, можно получить достаточно достоверные данные по распределению скорости ветра на местности. Компьютерное моделирование позволяет проводить исследования эффективности различных инженерных решений без создания сложных и дорогостоящих физических моделей. Получаемые результаты в то же время имеют достаточную точность [19, 20, 41, 46, 74, 120, 130, 162, 166, 191, 247].

Подобное компьютерное моделирование часто проводят при оценке воздействия ветра на здания и сооружения [41, 130, 166], оценке распространения выбросов на территории [19, 20, 41, 120, 191], однако к решению задачи в ветроэнергетике подобные расчёты проводятся в основном за рубежом, по большей части имеют локальный, не системный характер [233, 234, 238, 241, 244, 247]. Поэтому автором предлагается применение аэродинамических расчётов при многокритериальном анализе площадок для размещения ВЭС. Первые работы, проведённые автором показали перспективность использования аэродинамических расчётов при анализе площадок для размещения ВЭС [6-12, 207]. Также результаты анализа возможно использовать и при сравнении районов для размещения ВЭУ.

На заключительной стадии перед началом строительства проводится разработка электрической схемы проекта и выбор состава оборудования (задача V, рис. 1.3). Данная задача включает в себя широкий спектр расчётов: от проектирования самой схемы электроснабжения с выбором трансформаторов, кабелей и т.д., до выбора аккумулялирующих устройств и согласование параллельной работы ВЭУ с ДЭС, программного обеспечения для оптимальной работы аккумулялирующих устройств, ДЭС. Решению этих вопросов на разных этапах посвящено множество работ [2, 17, 39, 43, 51, 60, 66, 73, 84, 105, 108, 116, 128, 129, 171]. По многим электротехническим расчётам существуют давно разработанные методики: выбор трансформаторов, кабелей, инверторов и т.д. Отдельно изучались вопросы совместной работы ВЭУ и ДЭС, предложены алгоритмы расчётов оптимальных режимов, составлены программные комплексы.

С учётом всего перечисленного в первых четырёх задачах (рис. 1.3) можно выделить направления для дальнейшего совершенствования с учётом современного научно-технического прогресса:

- повышения точности расчётов;
- многокритериальный учет факторов при принятии решений;
- разработка программного обеспечения для анализа проектов и принятия решений.

В этой связи в диссертационной работе целью является совершенствование методического и программного обеспечения первых четырёх задач (рис. 1.3).

Обобщая факторы и возникающие трудности при решении обозначенных задач в ветроэнергетике, стоит отдельно упомянуть об ещё одном общем для всех факторе – большом объёме информации при проводимых энергетических расчётах на разных этапах, усложняющихся многокритериальным анализом и аэродинамическим моделированием. Сократить временные и человеческие ресурсы в решении задач помогают информационные и программные средства – однако этому в методической литературе практически не уделено внимания.

Поэтому большинство исследователей самостоятельно занимаются разработкой программ и программных комплексов [56, 73, 84, 107, 128, 206, 209]. Рассмотрим существующие методические и программные средства для решения задач в области ветроэнергетике.

1.4 Программные продукты для анализа решений задачи ввода ветроэнергетических мощностей

По проведённому обзору публикаций в России существуют единицы программ по анализу ветроэнергетического потенциала [84, 85, 167, 189]. Зачастую для решения задач привлекаются неспециализированное программное обеспечение, например, зарубежный пакет прикладных программ MatLab [69, 202]. Основное внимание исследователей уделено параллельной работе ВЭУ и ДЭС, работе ВЭУ совместно с аккумулирующими устройствами и солнечными электростанциями (СЭС) [4, 21, 64, 83, 107, 129].

В настоящее время отсутствуют программные, обеспечивающие комплексное решения таких важных задач как:

- оценка ветроэнергетического потенциала по данным метеостанций;
- анализ выработки электроэнергии ВЭУ по их мощностным характеристикам с учетом графиков нагрузок и статистически необработанных метеорологических данных;
- учёт влияния рельефа местности на выработку ВЭУ;
- поддержка принятия решений в условиях многих критериев по проблемам ввода ветроэнергетических мощностей.

Рынок программных продуктов, позволяющих проводить расчёты в области ветроэнергетики, развит лишь за рубежом. Так, получили широкое распространение программы:

- ALWIN, WAsP, WindFarm, WindFarmer, WindPRO, HOMER – программные продукты с широкими возможностями для анализа выработки электроэнергии ВЭУ с учётом технических характеристик ВЭУ, статистических данных по ветру, позволяют решить задачи оценки экономической эффективности проекта, оптимизации расположения ВЭУ относительно друг друга на местности [227, 239, 243]. Из этого ряда программ ALWIN является бесплатной;

- BLADED – анализ технических параметров ВЭУ;

- Greenius, RETscreen – анализ экономической эффективности, последствий ввода в эксплуатацию альтернативных источников энергии.

Поскольку, необходимо решать целую группу задач, приходится использовать программные продукты как минимум для четырех этапов:

1. Анализ общего ветроэнергетического потенциала и получение как можно более точных данных о параметрах ветра в районе.
2. Построение трёхмерной модели исследуемой местности.
3. Аэродинамический анализ.
4. Многокритериальный анализ вариантов размещения ВЭС.

Это приводит к необходимости использования нескольких программных продуктов, чаще зарубежного производства, что обуславливает целый ряд проблем, которые необходимо учитывать. Например, могут возникнуть сложности в совместимости исходных и выходных данных нескольких программных продуктов, выборе оптимального пути решения отдельных задач. Рассмотрим отдельные этапы подготовки исходных данных при решении задачи компьютерного моделирования ветрового потока с учетом рельефа местности для выбора перспективных площадок для размещения ВЭУ.

1. Выбор исходных данных для анализа ветроэнергетического потенциала района.

Поскольку измерения скорости ветра на местности требуют существенных материальных и временных затрат, как правило, используют справочные

статистические данные об изменениях скорости ветра по градациям. Более точные данные о скорости ветра в районе доступны на специализированных сайтах в сети интернет. Например, на сайте «Погода России» <http://meteo.infospace.ru/> или на сайте «Расписание погоды» <http://rp5.ru/> предоставлены данные многолетних измерений скорости ветра с детализацией до нескольких измерений в течение суток. Для использования этих данных, их статистической обработки и предварительного анализа ветроэнергетического потенциала района необходима разработка специального программного обеспечения.

2. Выбор исходных данных для построения трёхмерной модели рельефа местности.

Как правило, это данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) радарной топографической съемки большей части территории земного шара, за исключением самых северных ($>60^\circ$), самых южных широт ($>54^\circ$), а также океанов, произведенной NASA за 11 дней в феврале 2000 года с помощью специальной радарной системы. Объем собранной информации составил более 12 терабайт данных. Часть этой информации находится в свободном доступе [224].

Часто используют данные ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model) – растровые матрицы разрешением 15 м на пиксел, на большую часть земной поверхности. Продукт ASTER GDEM разработан совместно компаниями METI и NASA. ASTER GDEM был предоставлен системе GEOS и бесплатно доступен посредством загрузки из сети интернет через японский центр ERSDAC и LP DAAC NASA [224].

Также доступны данные:

- ETOPO1 – данные обеспечивают полное глобальное топографическое и батиметрическое покрытие между -90° до $+90^\circ$ по широте и -180° до $+180^\circ$ по долготы, что выгодно отличает ее от большинства других цифровых моделей рельефа, таких как GTOPO30, SRTM и др. [223];

- Landsat – глобальные данные космического наблюдения поверхности Земли разрешением от 15 метров (панхроматическое), 30 метров (спектрозональное). Имеются данные в виде мозаик на большие участки суши [231];

- OrbView-3 – работа спутника OrbView-3 осуществлялась с 2003 по 2007 г. С помощью установленной камеры OrbView High Resolution Imaging System были получены многочисленные панхроматические снимки разрешением 1 м и мультиспектральные снимки разрешением 4 м. Ширина полосы съемки составляла 8 км [201].

В зависимости от каждой конкретной задачи, условий, расположения исследуемой местности и её размера рационально использовать различные источники. Существующие программы для обработки исходных данных позволяют работать с широким спектром форматов.

3. Обработка исходных данных о рельефе местности.

В большинстве случаев исходные данные приходится обрабатывать для получения корректной модели рельефа – без аномально резких перепадов высот, без пустых мест.

В мире используется довольно большое число программных продуктов для создания и анализа цифровой модели рельефа [201]. Все они существенно отличаются по функциональным возможностям и цене. Модули мощных полнофункциональных дорогостоящих ГИС-пакетов имеют самые широкие возможности по моделированию поверхностей. Как правило, они поставляются за дополнительную плату в качестве надстройки к популярным программным комплексам и поэтому наиболее распространены в мире. В качестве примеров можно привести модули Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analyst ГИС-пакета ArcGIS (ESRI Inc.), Vertical Mapper программы MapInfo (MapInfo Corp.), Autodesk Map 3D системы AutoCAD (Autodesk Inc.), Terrain пакета GeoMedia (Intergraph Corp.).

Программы для создания систем виртуальной реальности имеют узкую направленность на компьютерную анимацию с использованием трёхмерных моделей рельефа и редко включают широкий набор аналитических функций. Из подобного класса программного обеспечения наибольшую популярность в мире приобрели: программа Virtual GIS, входящая в состав полнофункционального комплекса ERDAS Imagine (Leica Geosystems), комплексы MultiGen Creator Terrain Studio и MultiGen Vega Prime (MultiGen-Paradigm), программы ArcScene и ArcGlobe ГИС-пакета ArcGIS (ESRI Inc.), а также модуль SiteBuilder 3D (MultiGen-Paradigm) для ArcGIS.

Узкоспециализированные программные продукты для работы с цифровой моделью рельефа широко распространены благодаря низкой стоимости. Наиболее известны пакеты программ Surfer (Golden Software Inc.) и MicroDEM / Terra Base (U.S. Naval Academy). Как правило, они включают функции создания цифровой модели рельефа различными методами и построения тематических карт на их основе.

Наконец, в особый класс можно выделить программы для выполнения отдельных операций создания или обработки цифровой модели рельефа. Сюда относятся, например, векторизаторы для автоматической и полуавтоматической оцифровки растровых файлов сканированных карт. Из векторизаторов популярны отечественные программы Easy Trace (EasyTrace Group) и MapEDIT (Резидент) [78].

4. Использование плагинов программ 3d моделирования.

Упростить второй и третий пункты можно, используя плагины для программ 3d моделирования. Часто это платные плагины для официальных версий, но есть и trial версии с ограниченными возможностями или ограниченным сроком использования. Такие плагины существуют для 3Ds Max, Rhinoceros, AutoCAD Civil 3D [78]. Однако при их использовании, возможно снижение качества моделируемой поверхности – в некоторых случаях при импорте данных рельефа через Google Earth сглаживаются мелкие

неровности земной поверхности. Поэтому лучше использовать не плагины, а доступные данные о рельефе местности, скачиваемые с ресурсов, описанных выше.

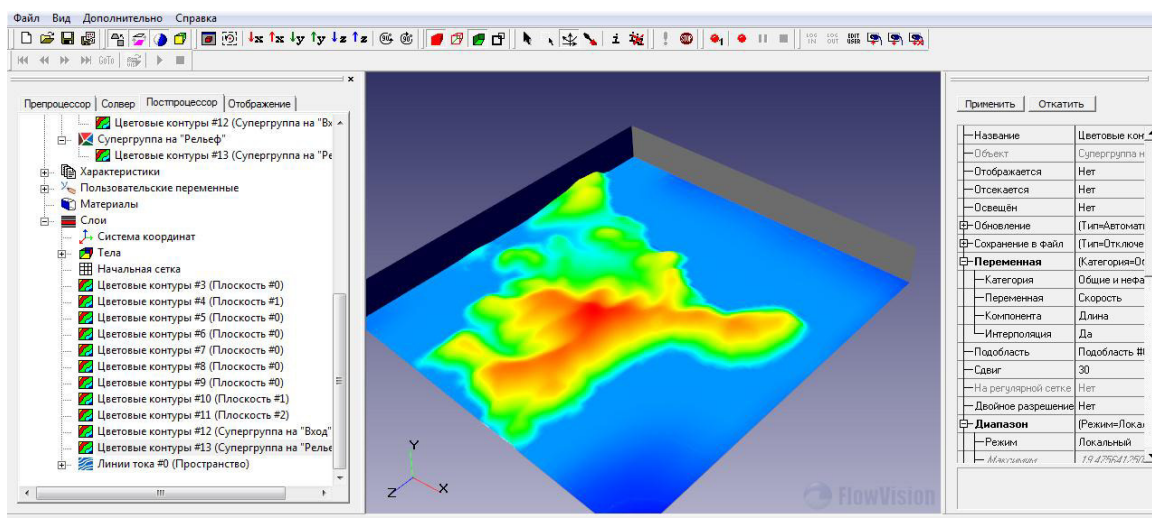


Рис. 1. 7. Скриншот окна программы Постпроцессора FlowVision 3.0 при моделировании обтекания воздушным потоком рельефа местности

Поскольку при подобных действиях часто приходится использовать булевы операции в программах 3d моделирования, существенно повышается вероятность проблем с импортом геометрии во FlowVision, а именно часто возникают проблемы с гранями: зазор между гранями, перекрытие между

гранями, самопересечения в контуре грани и др. Самый простой способ решения некоторых проблем – средствами самого FlowVision: воспользоваться функцией «Удаление маленьких треугольников», изменить допуск геометрии в Предустановках FlowVision, упростить геометрическую модель за счет изменения углов между поверхностями.

Также есть следующие рекомендации разработчиков FlowVision [230]: в случае, когда автоматические алгоритмы не справляются, необходимо попробовать поварьировать параметры экспорта из CAD, до тех пор, пока не получится корректная, либо излечимая автоматически поверхность. В ряде случаев помогает упрощение геометрической модели. При построении трехмерной модели в CAD системе необходимо избегать применения булевых операций с телами со сложной поверхностью или такие булевы операции, которые приводят к удалению или слитию слишком малых объемов, по сравнению с объемом тел, участвующих в булевой операции. Кроме того, необходимо избегать случаев создания поверхностей, сопряженных под слишком острым углом (меньше 3 градусов), в ряде случаев от ошибок триангуляции позволяет избавиться скругление или фаска на таких углах. Если получить корректную поверхность в CAD системе не удастся, то на помощь придут специализированные программы, позволяющие редактировать поверхностную сетку. К таким программам относится, например, 3DTransVidia или бесплатный MeshLab. В этих программах можно редактировать непосредственно треугольники. Также в них имеются свои инструменты для автоматического исправления, которые в тех или иных случаях могут оказаться как более эффективными, так и менее эффективными по сравнению с FlowVision [42].

В данном параграфе рассмотрены программные средства для анализа решений в области ветроэнергетики. Предоставляя исследователю достаточно большое количество инструментов для анализа и решения задач в области ветроэнергетики, программные средства также позволяют повысить скорость

проведения расчётов. Большинство разработанных продуктов для решения задач в области ветроэнергетики иностранного производства. Поэтому, ввиду нехватки отечественных разработок даже российские компании пользуются иностранным программным обеспечением для решения задач в области ветроэнергетики. Однако существуют направления для дальнейшего развития программного обеспечения: совершенствование многокритериального анализа районов и площадок для размещения ВЭС с учётом влияния рельефа местности и розы ветров.

Эта задача не решена в едином программном продукте. Существует целый комплекс вопросов и проблем при решении как многокритериальной задачи, так и учёте влияния рельефа местности и розы ветров. В работе при участии автора разработана программа для ЭВМ с возможностью многокритериального выбора района или площадки для размещения ВЭС, а также предложена методика для учёта влияния рельефа местности и розы ветров на эффективность использования ВЭУ, методика реализована в виде программы для ЭВМ.

1.5. Обзор методов принятия решений для задач ввода ветроэнергетических мощностей

В каждой из рассмотренных выше задач (рис.1.3) необходимо принимать решение:

- выбор наиболее перспективных пунктов;
- экономическая целесообразность проекта ВЭС в районе;
- выбор наиболее эффективных площадок для установки ВЭУ;
- выбор количества, мощности ВЭУ и др.

Задачи выбора осложняются слабой структурированностью, многокритериальностью, неопределенностью, неоднозначностью [112, 121, 123], поэтому применение методов принятия решений является необходимым в

данном случае. Методы принятия решений позволяют формализовать процесс принятия решений, избежать волюнтаристских заключений, ошибок лица, принимающего решения (ЛПР) из-за невнимательности, из-за необходимости анализа большого объема информации.

Обзор научно-методических источников показал, что в настоящее время не существует единой классификации методов принятия решений для реализации обозначенных задач. Будем использовать классификацию, приведённую в работах А. Б. Петровского [140].

В зависимости от характера информации, используемой для измерения параметров вариантов, способов агрегирования и преобразования данных условно выделяют следующие группы методов, основанные на измерении [140]:

1. Количественных показателей и сравнении вариантов по числовому значению ценности вариантов.

К этой группе относятся эвристические (способ Франклина, методы группы SMART) и аксиоматические методы оценки ценности или полезности решений (различные теории одномерной и многомерной полезности, МАУТ, метод аддитивной разности оценок, теория проспектов). Условно в группу включены человеко-машинные методы многокритериальной оптимизации и методы, основанные на использовании нечётких множеств.

2. Качественных показателей, которые переводятся в числовые оценки вариантов и числовые ценности вариантов.

В эту группу входят методы аналитической иерархии (МАИ) и условно включены методы, основанные на использовании нечётких множеств.

3. Количественных показателей и сравнении вариантов без вычисления их числовой ценности.

К данной группе относятся методы многокритериального сравнения вариантов по ограниченной пороговой предпочтительности с применением

специальных индексов согласованности предпочтений ЛПР, методы использующие функции выбора.

4. Качественных показателей и сравнении вариантов без вычисления их числовой ценности.

В эту группу входят методы вербального анализа решений, методы, использующие функции выбора.

Сформулируем требования к методам принятия решений в задачах (рис. 1.3) ввода ветроэнергетических мощностей:

1) Математическое обоснование метода. Последствия принимаемых решений по вводу ветроэнергетических мощностей будут проявляться несколько десятилетий. Необходимо использование методов принятия решений, результаты которых могут быть объяснены и подтверждены математически.

2) Получение количественного результата при многокритериальном анализе. При сравнении альтернатив в результате применения многих методов может быть получено ранжирование без количественной оценки. Такая информация не всегда позволяет принять окончательное решение. В этой связи для возможности сопоставления альтернатив, для возможности анализа чувствительности к изменениям структуры предпочтений и исходной информации целесообразно привлекать методы принятия решений, которые позволяют получить количественную оценку альтернатив

3) Возможность работы с информацией в условиях неопределенности. Многие методы принятия решений ориентированы на наличие полной и точной исходной информации. Однако для многих рассмотренных задач принятия решений (рис. 1.3) характерна неопределенность исходной информации или будущих условий. Это связано с тем, что принятие решения о выборе района или площадки проводится на начальных этапах проектирования, когда полная информация по проблеме отсутствует. В этой связи необходимо использовать

методы принятия решений, позволяющие проводить анализ в условиях риска или нечеткой исходной информации.

Исходя из сформулированных требований, методы 4 группы являются наименее применимы, так как используют преимущественно качественные показатели, а результат не имеет количественной оценки.

Для дальнейшего анализа были выбраны три метода из первых трех групп, получивших наибольшее распространение: MAUT, МАИ, ELECTRE (ELimination and Choice Expressing REality) [70, 81, 82, 240].

Метод MAUT (Multi-attribute utility theory) [27, 70, 80, 213, 235, 237] использует для принятия решений многокритериальную теорию полезности. В его основе лежит построение многокритериальной функции полезности на основе опроса ЛПР. Вид функции зависит от ряда условий, которые проверяются в диалоге с ЛПР. Функция позволяет дать оценки как исходным, так и новым альтернативам.

Метод МАИ [140, 161] состоит в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений ЛПР по парным сравнениям. В результате может быть выражена относительная степень (интенсивность) взаимодействия элементов в иерархии. Эти суждения затем выражаются численно. АНР включает в себя процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетности критериев и нахождения альтернативных решений.

Методы группы ELECTRE направлены на решение задач с уже заданными многокритериальными альтернативами. В отличие от метода МАИ в методах ELECTRE не определяется количественно показатель качества каждой из альтернатив, а устанавливается лишь условие превосходства одной альтернативы над другой.

Для сравнения методов выделим их достоинства и недостатки в отдельной таблице (таб. 1.2).

Таблица 1.2. Сравнительный анализ методов МАИ, ELECTRE, MAUT

Метод	Преимущества	Недостатки
МАИ	- может применяться в тех случаях, когда ЛПР не может дать абсолютные оценки альтернатив по критериям, а пользуется более слабыми сравнительными измерениями; - метод позволяет получить приоритеты в шкале отношений.	- обоснованность метода подвергается систематической критике [126, 141]; - введение новой, недоминирующей альтернативы может в общем случае привести к изменению предпочтений между двумя ранее заданными альтернативами.
ELECTRE	- позволяет гибко выражать предпочтения ЛПР; - возможность ЛПР активно участвовать в решении задачи и влиять на её результат; - предпочтения ЛПР формируются и уточняются в процессе поэтапного решения задачи; - позволяет учитывать несравнимость вариантов;	- не даёт количественную оценку вариантов; - возможно возникновение циклов на множестве вариантов; - необходимость проведения дополнительного анализа чувствительности результатов; - возможно нарушение условий транзитивности и полноты сравнений; - сложность в осуществлении компенсации при низких оценках альтернатив по одному критерию и высоких по другим;
MAUT	- имеет аксиоматическое обоснование; - можно применять в условиях определённости, риска и нечёткой исходной информации; - детальная проработка диалоговых процедур; - широчайшая апробация на задачах принятия решений в области энергетики.	- возможны трудности при построении функции полезности вследствие большого количества вопросов для ЛПР; - задание точных количественных измерений всех основных параметров является достаточно сложным для ЛПР; - нет возможности исследовать проблему привычным для человека методом «проб и ошибок», что может привести к различным результатам;

Проанализировав достоинства и недостатки выбранных методов, для дальнейшего применения выбран метод MAUT. Он имеет ряд недостатков, ограничивающих и затрудняющих его применение в различных задачах. Но для решения задач 1-4 (рис.1.3) с учётом обозначенных выше требований он является оптимальным и обладает целым рядом преимуществ, указанных выше. Далее более подробно опишем данный метод на основании обозначений, указанных в работах А. Б. Петровского [140].

Метод MAUT опирается на формальные допущения (аксиомы), которые отражают предпочтения ЛПР и задают индивидуальный вид функции полезности. Ниже опишем основные аксиомы.

Аксиома полной сравнимости. При сравнении любых двух вариантов A_i и A_j выполняется одно и только одно бинарное отношение между полезностями вариантов $u(A_i)$ и $u(A_j)$: либо равенство $u(A_i) = u(A_j)$, либо строгий порядок $u(A_i) > u(A_j)$ и $u(A_i) < u(A_j)$.

Аксиома транзитивности. Отношения равенства и строгого порядка между полезностями вариантов транзитивны: если $u(A_i) = u(A_j)$ и $u(A_j) = u(A_k)$, то $u(A_i) = u(A_k)$; если $u(A_i) > u(A_j)$ и $u(A_j) > u(A_k)$, то $u(A_i) > u(A_k)$.

Аксиома растворимости. Для любых вариантов A_i, A_j, A_k , таких, что $u(A_i) > u(A_j) > u(A_k)$, найдётся такая вероятность p , что полезности варианта A_j и простой лотереи (A_i, p, A_k) равны:

$$u(A_j) = u(A_i, p, A_k) = pu(A_i) + (1 - p)u(A_k) \quad (1.1)$$

Аксиома Архимеда. Для любых вариантов A_i, A_j, A_k , таких, что $u(A_i) > u(A_j) > u(A_k)$, найдутся вероятности p и q такие, что полезности варианта A_j и простых лотерей (A_i, p, A_k) , (A_j, q, A_k) удовлетворяют неравенствам:

$$u(A_i, p, A_k) > u(A_j) > u(A_i, q, A_k) \quad (1.2)$$

Аксиома независимости по предпочтению. Для любых вариантов A_i и A_j , таких что $u(A_i) \geq u(A_j)$, найдётся такая вероятность p , что полезности простых лотерей (A_i, p, A_k) и (A_i, q, A_k) при любом варианте A_k удовлетворяют неравенству:

$$u(A_i, p, A_k) \geq u(A_i, q, A_k) \quad (1.3)$$

Аксиома независимости по полезности. Для любых простых лотерей L_i и L_j , таких, что $u(L_i) \geq u(L_j)$, найдётся такая вероятность p , что полезности составных лотерей (L_i, p, A_k) и (L_j, q, A_k) при любом варианте A_k удовлетворяют неравенству:

$$u(L_i, p, A_k) \geq u(L_j, q, A_k) \quad (1.4)$$

Доказано, что при выполнении вышеописанных аксиом [140], существует действительная многомерная функция полезности $u(A_i)$, заданная на множестве вариантов $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ в виде полилинейной функции:

$$u(A_i) = \sum_{q=1}^n i_q u_q(x_{iq}) + k \sum_{q=1}^n \sum_{p>q} l_p l_q u_q(x_{iq}) u_p(x_{ip}) + \dots + k^{n-1} l_1 \dots l_n u_1(x_{i1}) u_2(x_{i2}) \dots u_n(x_{in}) \quad (1.5)$$

Здесь $u_q(x_{iq})$ – полезность оценки x_{iq} варианта A_i по q -му частному критерию K_q , удовлетворяющая условию нормировки $0 \leq u_q \leq 1$, причём $u_q(x_q^{\min}) = 0$, $u_q(x_q^{\max}) = 1$, $x_q^{\min}$ – худшая и $x_q^{\max}$ – лучшая оценка по шкале критерия K_q ; $0 < l_q < 1$ – частный шкалирующий параметр, который определяется значением функции полезности $l_q = u(x_1^{\min}, \dots, x_{q-1}^{\min}, x_q^{\max}, x_{q+1}^{\min}, \dots, x_n^{\min})$. Общая шкалирующая константа $k > -1$ находится из характеристического уравнения.

$$k + 1 = \prod_{q=1}^n (k l_q + 1) \quad (1.6)$$

При $\sum_{q=1}^n l_q = 1$ функция полезности $u(A_i)$ приобретает аддитивную форму:

$$u(A_i) = \sum_{q=1}^n l_q u_q(x_{iq}), \quad (1.7)$$

а при $\sum_{q=1}^n l_q \neq 1$ - мультипликативную форму:

$$ku(A_i) + 1 = \prod_{q=1}^n [kl_q u_q(x_{iq}) + 1] \quad (1.8)$$

При $k=0$ мультипликативная функция полезности сводится к аддитивной функции. Как и в одномерном случае, вариант A_i предпочтительнее для ЛПР варианта A_j ($A_i \succ A_j$) тогда и только тогда, когда $u(A_i) > u(A_j)$, варианты эквивалентны для ЛПР ($A_i \approx A_j$), когда $u(A_i) = u(A_j)$.

Метод MAUT достаточно трудоемок, и не всегда эффективен для анализа на отдельных этапах задач. В некоторых случаях возможно применение менее трудоёмких эвристических методов, что важно для экономии усилий ЛПР. Одним из наиболее известных является SMART [140], имеющий схожее методическое описание с методом MAUT. Метод SMART не требует проверки независимости, что в случае анализа субкритериев вполне допустимо. При оценке методом SMART [140]:

1. Формируется перечень $A_1, \dots, A_n$ всех возможных вариантов решения проблемы и задаётся набор критериев их оценки $K_1, \dots, K_n$, которые имеют одинаковую балльную шкалу в пределах от 1 до 5 (до 10, до 100).

2. ЛПР упорядочивает все критерии $K_1, \dots, K_n$ по важности и указывает значимость s_q каждого критерия K_q в баллах. Самый важный критерий получает максимальный балл, а остальные критерии – меньшие баллы в зависимости от их важности.

3. Вычисляется вес q -го критерия K_q по формуле:

$$\omega_q = \frac{s_q}{\sum_{j=1}^n s_j} \quad (1.9)$$

4. ЛПР оценивает частные ценности $u_q(A_i)$ каждого варианта A_i по каждому q -му критерию K_q , используя введённую балльную шкалу.

5. Вычисляется общая ценность $u(A_i)$ каждого варианта A_i как взвешенная сумма частных ценностей, определяемая по формуле:

$$u(A_i) = \sum_{q=1}^n \omega_q u_q(A_i) \quad (1.10)$$

6. Варианты $A_1, \dots, A_n$ упорядочиваются по значениям общей ценности $u(A_i)$. Вариант, имеющий наибольшую общую ценность $u(A_i)$, выбирается в качестве лучшего.

7. ЛПР оценивает чувствительность результата к изменениям весов отдельных критериев.

При оценке модифицированным методом SMARTER, используется нелинейная функция общей ценности варианта $u(A_i)$ вместо линейной. Вместо вычисления веса ω_q q -го критерия K_q по его прямой оценке ЛПР ранжирует критерии по важности, и вес ω_q рассчитывается по специальной процедуре на основании рангов критериев. Вес критерия рассчитывается по следующей формуле:

$$\omega_q = \frac{r_q}{\sum_{j=1}^n r_j} \quad (1.11)$$

где r_q – ранг критерия.

Методы группы SMART дают целостную оценку вариантам, просты и удобны при практическом применении. Проверка чувствительности общей ценности к изменениям весов позволяет оценить влияние неточностей оценок. Вместе с тем, во всех разновидностях метода не учитываются возможная

зависимость между частными критериями и их неаддитивность. SMARTER менее «прозрачен» для ЛПП, чем SMART, а также усиливает различие между наиболее важными для ЛПП критериями [140].

Итак, для поддержки принятия решений в сформулированных задачах ввода ветроэнергетических мощностей (рис. 1.3) были проанализированы методы четырех групп. Исходя из сформулированных требований, наибольшее соответствие показали методы первой группы. Во второй главе при разработке методического обеспечения будут использоваться: метод MAUT, методы группы SMART.

1.5. Выводы по первой главе

1. Рассмотрены предпосылки и сложности применения ВЭС в России. Показано, что ввод ветроэнергетических мощностей в России актуален и экономически целесообразен: в отдельных северных районах, при децентрализованном энергоснабжении, при энергоснабжении потребителей в рекреационных зонах. Актуальность ввода ветроэнергетических мощностей отражена в Энергетической стратегии России до 2035 года и имеет законодательную поддержку.

2. Выделено пять задач при вводе ветроэнергетических мощностей. Проведён анализ методической и нормативной базы для решения этих задач, на основании которого выдвинуты предложения по совершенствованию:

1) Многокритериальный анализ при принятии решений по вводу ветроэнергетических мощностей при выборе площадок и районов для размещения ВЭС.

2) Уточнение технико-экономической оценки проектов ВЭС на основе:

- использования статистически необработанных данных измерений метеостанций;

- использования мощностных характеристик ВЭУ без привлечения приближенных формул расчёта;

- использования суточных графиков нагрузок потребителя, без привлечения коэффициента разновременности для расчёта выработки востребованной электроэнергии.

3) Учёт влияния рельефа местности на основе аэродинамического моделирования и информации о розе ветров при размещении ВЭС, при оценке экономического эффекта проектов ВЭС.

3. Проведен обзор программных продуктов, применяемых при решении задач ввода ветроэнергетических мощностей. Программного продукта, позволяющего произвести комплексное решение всего круга задач, не найдено. Для определения эффективных мест размещения ВЭС имеются разнородные неспециализированные программы, обеспечивающие отдельные этапы задачи. Построение программного комплекса на их основе представляет сложную задачу.

4. Для поддержки принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей в исследовании были рассмотрены методы многокритериального выбора, обозначены требования, которым они должны удовлетворять для решения данных задач. В результате проведенного сравнительного анализа был выбран метод MAUT для решения круга обозначенных многокритериальных задач. Также отмечены методы группы SMART для вспомогательного использования при сравнении альтернатив по субкритериям.

АГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

2.1. Поддержка принятия решений при выборе района для размещения ВЭС

В первой главе были рассмотрены особенности задачи выбора района для размещения ВЭС (рис. 1.3), которая входит и предоставляет информацию для более общей задачи оптимизации развития генерирующих станций (рис. 1.2). К недостаткам методического обеспечения, которое существует на данный момент для решений задачи выбора района размещения ВЭС можно отнести слабую степень формализации и недостаточно проработанные процедуры поддержки принятия решений при многокритериальном анализе. Поэтому основной задачей на данном этапе является разработка методики многокритериального выбора района для размещения ВЭС. Создание методики позволит повысить степень формализации и улучшить процедуры поддержки принятия решений при многокритериальном выборе района. В результате повысится качество принимаемых решений за счет системного подхода к задаче и учета значимых факторов не только экономического характера, но и социального, экологического.

В структуру главы входят следующие основные этапы:

1. Формулировка задачи многокритериального выбора района размещения ВЭС и уточнение методов для её решения.
2. Разработка и совершенствование методики для решения задачи выбора района в условиях неопределённости предпочтений ЛПП в отношении ценности критериальных оценок.
3. Разработка методики многокритериального выбора площадок для размещения ВЭС.

2.1.1. Формулировка задачи многокритериального выбора района размещения ВЭС

Задачу выбора района для размещения ВЭС можно сформулировать следующим образом. Существует множество альтернатив выбора $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, которыми являются районы размещения ВЭС. Для их оценки сформировано множество критериев $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, которые могут состоять из множества субкритериев $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ip}\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом многокритериальных оценок альтернатив по критериям множества F .

Альтернативой является район, представляющий интерес для размещения ВЭС. Как правило, район определяется исходя из некоторого экономически-целесообразного для передачи электроэнергии расстояния до центра электрических нагрузок ожидаемых потребителей. Как правило, район охватывает территорию от 10х10. В некоторых случаях район определяется территорией с высокими характеристиками ветроэнергетического потенциала. Такие районы могут включать поля, береговые линии, возвышенности – участки порядка 30х30 км.

Множество критериев $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ будет характеризовать степень достижения целей, преследуемых при выборе района. При формировании целей следует учитывать пять главных групп факторов [70]:

1. Экономические факторы.
2. Факторы, связанные с окружающей средой.
3. Социально-экономические факторы.
4. Факторы здоровья и безопасности.
5. Факторы общественного мнения.

Анализ этих факторов и определяет проблему выбора района. Данные факторы позволяют сформулировать цели, а также критерии их достижения.

Каждый критерий представляет собой определённый параметр, который может принимать разные значения, отражая степень выполнения цели.

Каждый критерий оценки желательно выбирать так, чтобы была ясна связь между критериями и основными целями отбора. Решение о том, включать или не включать критерий во множество $F = \{ f_1, f_2, \dots, f_n \}$ для оценки альтернатив $A = \{ a_1, a_2, \dots, a_k \}$, зависит от степени влияния этого критерия. Например, если все районы территориально находятся на одном пути миграции птиц или находятся в одной рекреационной зоне, или имеют примерно одинаковую экологическую обстановку то, соответственно, эти факторы следует исключить из анализа. Но, с другой стороны, эти факторы необходимо учитывать при принятии решения о выборе типа электростанции.

Одной из проблем при формировании множества критериев является то, что описать степень достижения цели не всегда возможно одним параметром. Критерии могут иметь большое количество составных параметров, так или иначе влияющих на оценку по этому критерию. В таком случае возникает задача определения одного комплексного критерия, оценки по которому будут определять составные критерии или субкритерии $S = \{ s_1, s_2, \dots, s_p \}$. Выделение субкритериев в явном виде облегчает работу ЛПР по оценке района относительно одного комплексного критерия, поскольку человеческие возможности обработки информации ограничены. Это связано с ограниченным объемом кратковременной памяти человека [80, 248, 252]. Так, в работах [80, 27] показано, что ЛПР может проводить устойчивые сравнения лишь по двум, трем критериям. Формирование субкритериев, их попарное сравнение позволит снизить вероятность неверных оценок по комплексным критериям. Например, критерий, отражающий социально-экономические факторы, можно разбить на субкритерии, которыми будут являться: динамика численности населения в районе, наличие инвестпроектов, степень развитости инфраструктуры и т.д.

При формировании критериев или субкритериев необходимо также учитывать степень их влияния на комплексную оценку. Если диапазон

изменения оценок по субкритерию для всего множества альтернатив несущественен, его не следует включать в анализ.

Для повышения качества принимаемых решений и уменьшения затрат трудовых ресурсов на анализ необходимо формировать независимые друг от друга критерии, влияющие на разные характеристики. Например, в случае оценки районов для размещения ВЭС, работающей совместно с ДЭС, пара критериев «Среднегодовая скорость ветра, м/с» и «Экономия топлива, т/год» находятся в прямой зависимости. Поэтому достаточно включить в анализ один из этих критериев.

2.1.2 Выбор метода принятия решений для многокритериальной оценки района размещения ВЭС

Проведенный в параграфе 1.4 обзор методов принятия решений позволяет заключить, что наиболее эффективным для решения поставленной задачи является метод MAUT из группы аксиоматических методов рационального выбора (таблица 1.1.). В параграфе 1.4. были отмечены его достоинства и недостатки, однако можно дополнительно указать на его преимущества при решении задачи выбора района для размещения ВЭС:

1. Возможность анализа достаточно большого количества альтернатив. Например, количество районов для размещения ВЭС вполне может достигать 20 и более. Многие методы, например, основанные на парных сравнениях, будут иметь низкую эффективность в таких условиях.

2. Возможность оценки новых введенных альтернатив, при условии, что их критериальные оценки не выходят за диапазон изменения оценок существующих альтернатив. Это позволяет исследовать влияние на ранжирование новых альтернатив. Многие методы, при появлении новой альтернативы требуют повторных сравнений [70, 134, 195, 206].

2.1.3 Разработка методики многокритериального выбора района размещения ВЭС

На рис. 2.1 представлена предлагаемая методика многокритериального выбора района на основе метода MAUT [27, 82, 203].

1	Формирование иерархии целей исследования
2	Формирование альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$
3	Формирование критериев $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ и множеств субкритериев $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ip}\}$
4	Оценка альтернатив по критериям и субкритериям
5	Проверка условий применимости метода MAUT
6	Построение однокритериальных функции ценности $v(y_i)$
7	Оценка ценности альтернатив по однокритериальным функциям ценности
8	Оценка шкалирующих коэффициентов
9	Многокритериальная оценка альтернатив
10	Анализ чувствительности альтернатив
11	Ранжирование альтернатив

Рис. 2.1. Методика многокритериального выбора районов размещения ВЭС

Перейдём к более подробному описанию методики. На первом этапе формируются цели исследования. Характерными целями при выборе района для размещения ВЭС являются:

- максимизация экономической эффективности работы ВЭС;
- максимизация стабильности работы ВЭС;
- максимизация положительного влияния на уровень социального развития в районе;

- максимизация положительного влияния на экологическую обстановку в районе.

В зависимости от условий той или иной задачи, или специфики районов, факторы могут меняться как в числе, так и в приоритете. Как правило, самым весомым фактором в задаче размещения ВЭС, всё же остаётся экономическая эффективность проекта. Однако она может отходить на второй план при особых экологических условиях районов, наличии рекреационных зон или при реализации стратегических задач энергоснабжения района.

Далее, на втором этапе, исходя из условий инвестиционного замысла [68, 122], стратегических задач развития районов составляется набор альтернативных районов, из которых следует в дальнейшем выбрать наиболее перспективные.

Чтобы измерить степень достижения целей в процессе исследования на третьем этапе формируются критерии и субкритерии. Принципы их формирования рассмотрены в параграфе 2.1.1.

Перейдем к рассмотрению особенностей этапа 4 (рис. 2.1). На этом этапе необходимо провести оценку альтернатив по всем критериям. Оценки могут быть количественными и качественными. Качественные оценки, как правило, назначаются экспертами. Количественные оценки необходимо задать по соответствующим параметрам, характеризующим критерий. Например, параметр, характеризующий критерий экономической эффективности является чистый дисконтированный доход (ЧДД) измеряющийся в денежных единицах (рубли, доллар и т.д.).

Стоит отметить, что область эффективного использования метода МАУТ будет ограничиваться количеством критериев, что связано с возрастающими трудозатратами при выполнении проверок независимости. Так, согласно [70] максимальное количество критериев, исходя из этих соображений, составляет 5-7. В этой связи, при использовании метода формируются комплексные критерии, включающие в свой состав несколько влияющих параметров или субкритериев. Сравнение альтернатив по комплексным критериям затруднено,

поскольку ЛПР необходимо учитывать одновременно оценки нескольких субкритериев. Так, сравнивая экологические воздействия ВЭС в различных районах, ЛПР необходимо использовать субкритерии для оценки влияния ВЭС на население, флору и фауну. Для применения метода MAUT нужно каждую альтернативу оценить по всем субкритериям и выразить количественно ее ценность по комплексному критерию. Для этого предлагается использовать более легкий и удобный для ЛПР по сравнению с MAUT эвристический метод группы SMART (the Simple Multi Attribute Rating Technique) [27, 121, 140].

Целью пятого этапа является проверка условий применимости метода MAUT в исследовании. Для этого необходимо проверить выполнение для ЛПР условий-аксиом MAUT, описанных в параграфе 1.4. При выполнении условий взаимной независимости по полезности можно получить многокритериальную функцию полезности $u(y)$ в аддитивном (2.1) или мультипликативном (2.2) виде [140]:

$$u(y) = u(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(y_i) \quad (2.1)$$

$$ku(y) + 1 = ku(y_1, y_2, \dots, y_n) + 1 = \prod_{i=1}^n [kk_i u_i(y_i) + 1] \quad (2.2)$$

где $u_i(y_i)$ – однокритериальная функция полезности; y_i – исход (оценка) альтернативы по критерию i ; k, k_i – шкалирующие коэффициенты.

Если рассматривается выбор в условиях определённости, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению позволяет получить многокритериальную функцию ценности (МФЦ) в аддитивном виде [140]:

$$v(y) = v(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(y_i) \quad (2.3)$$

где $v_i(y_i)$ – однокритериальная функция ценности.

Для получения многокритериальной функции необходимо определить значения шкалирующих коэффициентов, а также однокритериальные функции полезности (ценности) (ОФЦ).

В случае невыполнения условий независимости анализ может существенно усложниться. Если аксиомы независимости по предпочтению или полезности не выполняются, то рекомендуется перегруппировать или агрегировать зависимые критерии и заново решить задачу, либо воспользоваться каким-либо из способов компенсации, позволяющим уравновесить полезности вариантов по частным критериям [140].

Целью шестого этапа является построение однокритериальных функций ценности. Функции устанавливают ценность для ЛПР всех критериальных оценок, выражаемую значениями от 0 до 1. Далее будет рассмотрена стандартная процедура построения ОФЦ. В параграфе 2.2. будет изложена модификация процедуры для учёта неопределённости ЛПР в отношении оценок альтернатив.

Рассмотрим стандартную процедуру построения. Допускается её представление в кусочно-линейном виде, но может быть выполнена и аппроксимация функции по определённым ЛПР точкам. На рис. 2.2 представлен пример построения ОФЦ для критерия «Чистый дисконтированный доход».

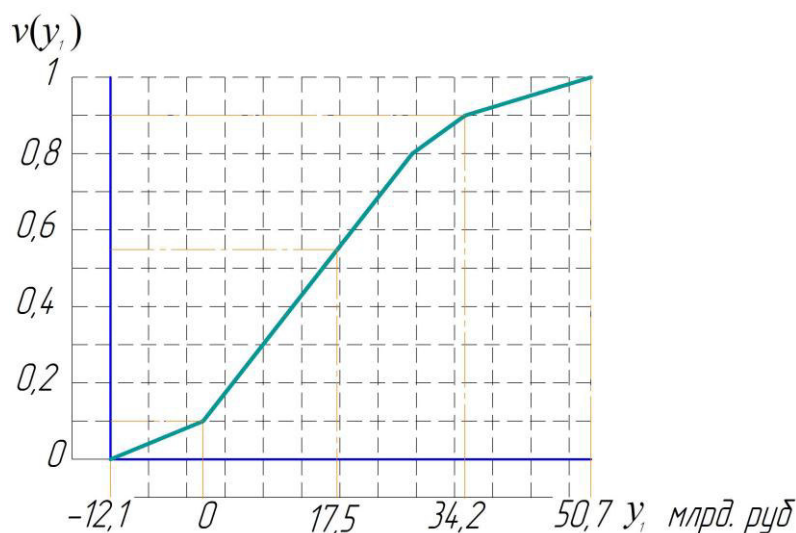
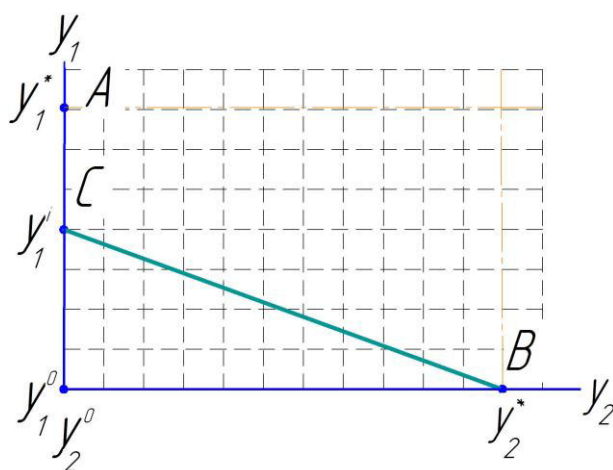


Рис. 2.2. Функция ценности для критерия «Чистый дисконтированный доход».

По оси абсцисс расположены оценки ожидаемого чистого дисконтированного дохода для каждого района. Максимальной оценке

На этом этапе, а также при анализе оценок альтернатив ЛПР может исключить из рассмотрения районы с недопустимо низкими оценками. Однако необходимо учитывать то, что по другим критериям такие районы могут иметь очень высокие оценки.

Цель восьмого этапа – определить шкалирующие коэффициенты, которые отражают вес или важность каждого критерия с учетом взаимных масштабов диапазонов критериальных оценок. Определение шкалирующего коэффициента каждого из выбранных критериев производится с помощью поиска точек безразличия на плоскостях пар критериев (рис. 2.3). Оценки других критериев, при сравнении пары, фиксируются на худшем уровне для исключения из анализа, так как ценность их равна 0.



67

По осям располагаются оценки сравниваемых критериев от худших к лучшим. Первоначально ЛПР определяет своё предпочтение между альтернативами в двух точках: $A[y_1^*; y_2^0]$ и $B[y_1^0; y_2^*]$.

Если вариант в точке А предпочтительнее, то это означает, что критерий y_1 важнее для ЛПР, чем критерий y_2 . Далее определяется точка С на шкале более важного критерия y_1 такая, что варианты в точках С и В были равноценными. В таком случае при учете того, что оценки всех других критериев зафиксированы на худших уровнях, многокритериальные оценки альтернатив могут быть записаны: $C \Rightarrow v_1(y_1^i) \cdot k_1 + v_2(y_2^0) \cdot k_2$ и $B \Rightarrow v_1(y_1^0) \cdot k_1 + v_2(y_2^*) \cdot k_2$, которые можно приравнять:

$$v_1(y_1^i) \cdot k_1 + v_2(y_2^0) \cdot k_2 = v_1(y_1^0) \cdot k_1 + v_2(y_2^*) \cdot k_2 \quad (2.4)$$

При условии, что ценность худших оценок равна 0, а лучших – 1, выражение принимает вид:

$$v_1(y_1^i) \cdot k_1 = k_2 \quad (2.5)$$

Аналогичным образом сравниваются другие пары критериев.

Сумма всех шкалирующих коэффициентов должна равняться единице:

$$k_1 + k_2 + \dots + k_n = 1 \quad (2.6)$$

С учетом (2.6) при n критериях необходимо выполнить $n-1$ сравнение по выражениям (2.4)-(2.5) для того, чтобы сформировать систему уравнений с единственным решением.

Пример системы уравнений для случая формирования пар сравнения с первым критерием будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} k_1 v_1(y_i) = k_2 v_2(y_j), \\ \dots \\ k_1 v_1(y_m) = k_{n-1} v_{n-1}(y_t), \\ k_1 + k_2 + \dots + k_n = 1. \end{cases} \quad (2.7)$$

где y_i, y_j, y_m, y_t – оценки по критериям, при которых сравниваемые пары альтернатив равноценны.

В результате решения системы уравнений будут получены шкалирующие коэффициенты.

В целом, можно рекомендовать проведение сравнения с теми парами критериев, которые сопоставимы по смыслу. Например, для ЛПР, как правило, удобно проводить сравнение неэкономических критериев с экономическим [80, 134, 203].

Целью девятого этапа (рис. 2.1) является получение многокритериальных оценок всех альтернатив по формуле (2.1), (2.2) или (2.3).

Как правило, после получения оценок сразу же выполняется проверка на общую адекватность полученных результатов, поскольку ЛПР мог ошибиться при построении ОФЦ или оценке шкалирующих коэффициентов. Рекомендуется проводить повторный анализ через несколько дней для проверки качества многокритериального выбора [203, 140, 80].

На десятом этапе проводится анализ чувствительности альтернатив. Анализ чувствительности – это исследование изменчивости ранжирования альтернатив и их оценок при варьировании в небольших пределах [81, 82, 140]:

- исходных данных;
- однокритериальных функций ценности;
- шкалирующих коэффициентов.

В случае, сильного реагирования альтернатив на небольшие изменения вышеобозначенных параметров и значительном изменении своего порядка в ранжировании – они признаются неустойчивыми и при окончательном решении выбора района необходимо отдавать им меньшее предпочтение. При этом можно считать перспективной альтернативу с высокой, хоть и не лучшей многокритериальной оценкой, если эта оценка при этом не подвержена большим изменениям.

Анализ чувствительности позволяет выявить [81, 82, 140]:

- оценки экспертов и ценностные установки, которые могут существенно влиять на результаты анализа;

- перспективные и неперспективные для дальнейшего рассмотрения районы.

В параграфе 2.2 будет предложена модификация метода MAUT, позволяющая улучшить процедуру анализа чувствительности. Улучшение заключается в том, что элементы анализа вводятся не на заключительном этапе, а закладываются в основу анализа при построении однокритериальных функций ценности.

На одиннадцатом этапе (рис. 2.1) проводится окончательное ранжирование районов по их многокритериальным оценкам с учетом анализа чувствительности. В целом, на заключительном этапе решение остается за ЛПР, который использует результаты проведенного исследования для обоснования своего вывода.

2.2. Разработка методики принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок

В отличие от однокритериальных, в многокритериальных задачах для ЛПР существуют определённые трудности, связанные с переработкой информации при решении задач. Исследователь часто может определить основные критерии, установить связи между ними, т.е. построить модель, адекватно отражающую предпочтения. Но точные зависимости между критериями, задание точных функций ценностей для ЛПР в многокритериальных задачах, как правило, представляет затруднения [68, 81, 82, 112, 140]. Так, для преодоления противоречий между требованиями нормативных методов и возможностями человеческой системы переработки информации разработана целая группа вербальных методов [82, 203, 229] как важное направление, которое предполагает решение без количественных оценок.

В то же время при решении задачи выбора районов для эксплуатации ВЭС применение вербальных методов будет иметь недостатки:

1. Большое число критериев, а также градаций оценок по критериям ведет к чрезмерному повышению сложности для ЛПР применения вербальных методов, а их укрупнение и агрегация существенно снижает точность решения.

2. Невозможность получить количественные оценки, а лишь ранжировать альтернативы, т.е. остается непонятным степень превосходства альтернатив.

3. Использование порядковых шкал. Порядковые шкалы уступают числовым шкалам интервалов и шкалам отношений по точности измерений.

4. Меньшая «разрешающая способность» вербальных методов, по сравнению с МАУТ, в результате часть альтернатив остается несравнимой.

С учётом обозначенных недостатков и достоинств метода МАУТ, которые были отражены в параграфе 1.4, для решения поставленной задачи выбора района для размещения ВЭС был выбран метод МАУТ. В работах [134, 135, 212, 213] – была предложена методика совершенствования метода МАУТ в направлении учёта неопределённости предпочтений ЛПР в отношении критериев. Эти разработки могут применяться в рассматриваемой задаче.

В данной работе ставится задача дальнейшего совершенствования метода МАУТ, для ситуации, когда у ЛПР существует неопределённость в предпочтениях относительно оценок альтернатив. Предлагается дать возможность ЛПР задавать не точные оценки, а интервалы оценок. Рассмотрим более подробно модификацию метода.

На рис. 2.4 представлены основные этапы МАУТ, серым цветом показаны дополнительные процедуры.

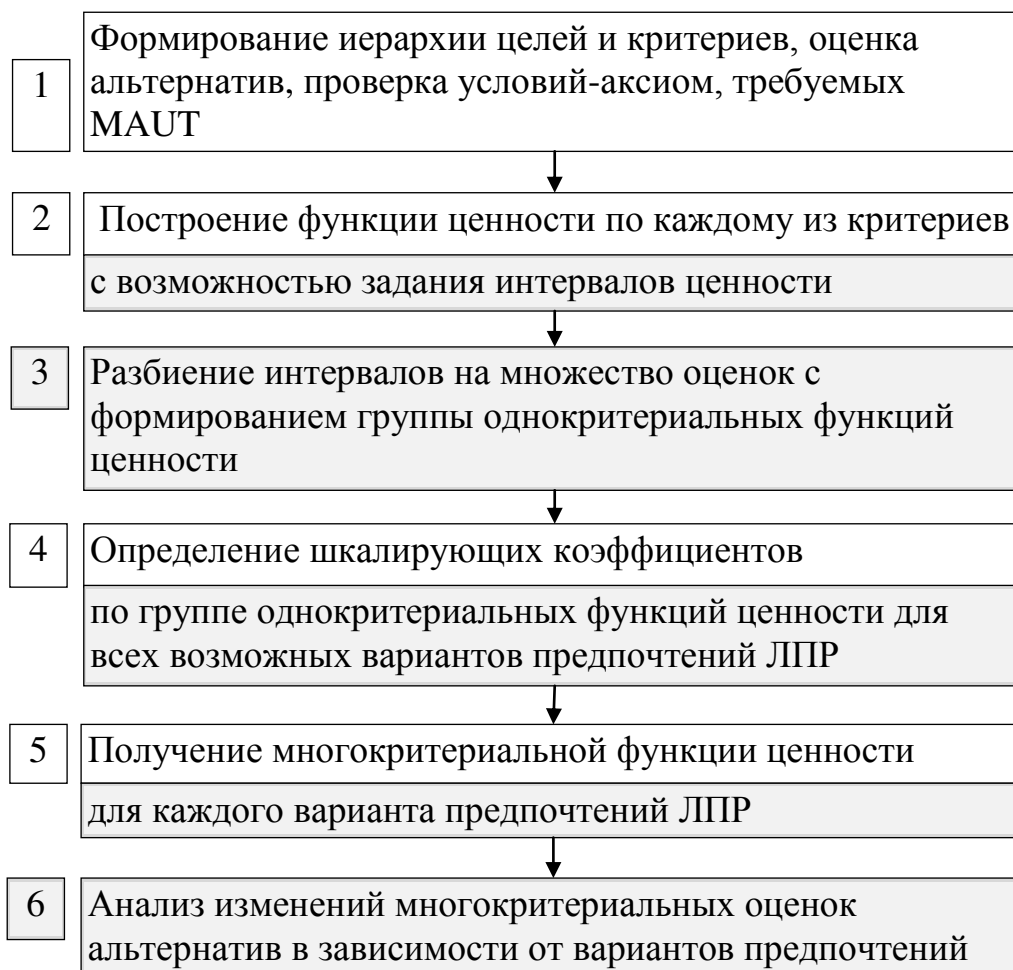


Рис. 2.4. Методика принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок

Рассмотрим подробнее этап 2 (рис. 2.4). На рис. 2.5(а) представлен общий вид функции ценности. Для ее построения проводится опрос ЛПР. Первоначально известны две точки функции: худшая оценка по критерию, имеющая нулевую ценность $v(y_i^0) = 0$ и лучшая оценка с ценностью $v(y_i^*) = 1$. Для определения промежуточных точек ЛПР задаётся вопрос: «Определите такую оценку по критерию y_i^n , что переходы от y_i^0 до y_i^n и от y_i^n до y_i^* равнозначны по ценности». Определенная ЛПР оценка y_i^n имеет ценность 0,5. Аналогичным образом определяются оценки по критериям с ценностью 0,25 и 0,75. При необходимости могут быть определены дополнительные точки функции ценности.

Также возможен альтернативный ход построения функции ценности с принятием во внимание имеющихся оценок по критериям для каждой альтернативы. ЛПР предлагают определить ценность значения y_i^1 , y_i^2 , y_i^3 и так далее для различных значений.

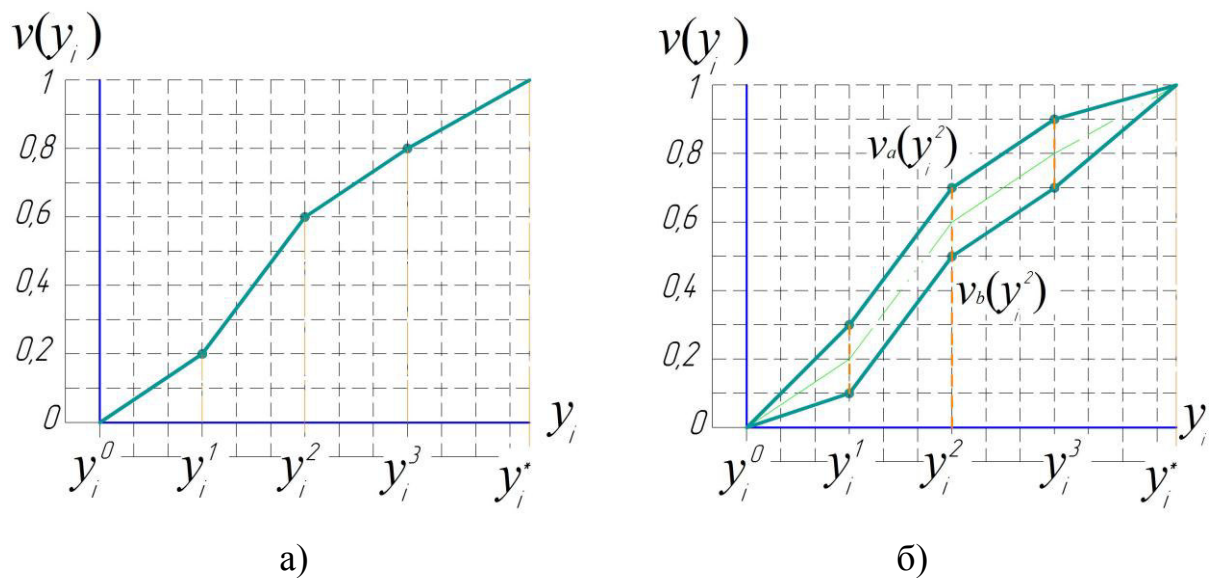


Рис. 2.5. Пример построения функции ценности: а) классический метод построения, б) модифицированный метод с учётом размытых оценок ЛПР.

Поскольку ЛПР может испытывать трудности в отождествлении данных по критерию с точными оценками шкалы функции ценности предлагается дать возможность обозначить границы оценок – естественное решение для отражения колебаний в определении ценности значений критерия для ЛПР. Например, на рис. 2.5.(б) для значения i -го критерия y_i^2 ЛПР определил две возможные ценности $v_a(y_i^2)$ и $v_b(y_i^2)$, в результате сформировав интервал: $[v_a(y_i^2), v_b(y_i^2)]$. Задание границы оценок приведёт к тому, что функция будет иметь вид, представленный на рис. 2.5. (б). Границы оценок можно установить для каждого критерия индивидуальными. На рис. 2.5.(б) линии излома границ располагается вертикально – в соответствии с ходом рассуждений ЛПР – когда сначала ему задаётся значение критерия, который он пытается оценить по шкале ценности. Таким образом, в дальнейших процедурах каждая оценка по критерию будет оцениваться не конкретной ценностью, а интервалом. Такие

интервалы разбиваются на множество оценок n с формированием группы однокритериальных функций ценности (рис. 2.6).

При n критериях и p оценках это приведёт к формированию n^p вариантов возможных оценок и, следовательно, n^p многокритериальных функций.

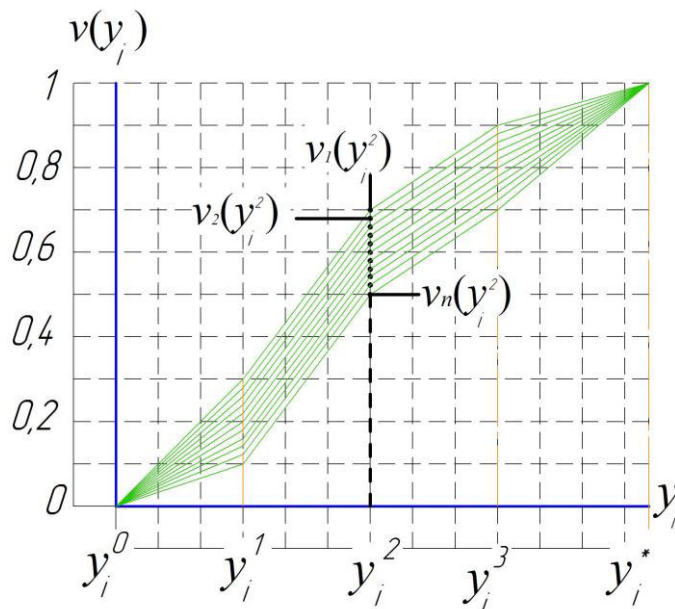


Рис. 2.6. Разбиение интервала на n однокритериальных функций.

На четвёртом этапе производится определение шкалирующих коэффициентов. Спецификой этого этапа является тот момент, что после определения равноценных альтернатив, из-за интервально заданных предпочтений относительно ценности альтернатив, шкалирующие коэффициенты при этом тоже будут определяться в интервале. Таким образом, при формировании n^p вариантов возможных оценок аналогичное количество формируется и шкалирующих коэффициентов для каждого критерия.

Далее на пятом этапе, вследствие замены интервалов множеством оценок (рис.2.6), будет получено множество многокритериальных оценок альтернатив. Соединив линиями полученные многокритериальные оценки альтернатив, получим графики, отображённые на рис. 2.7.

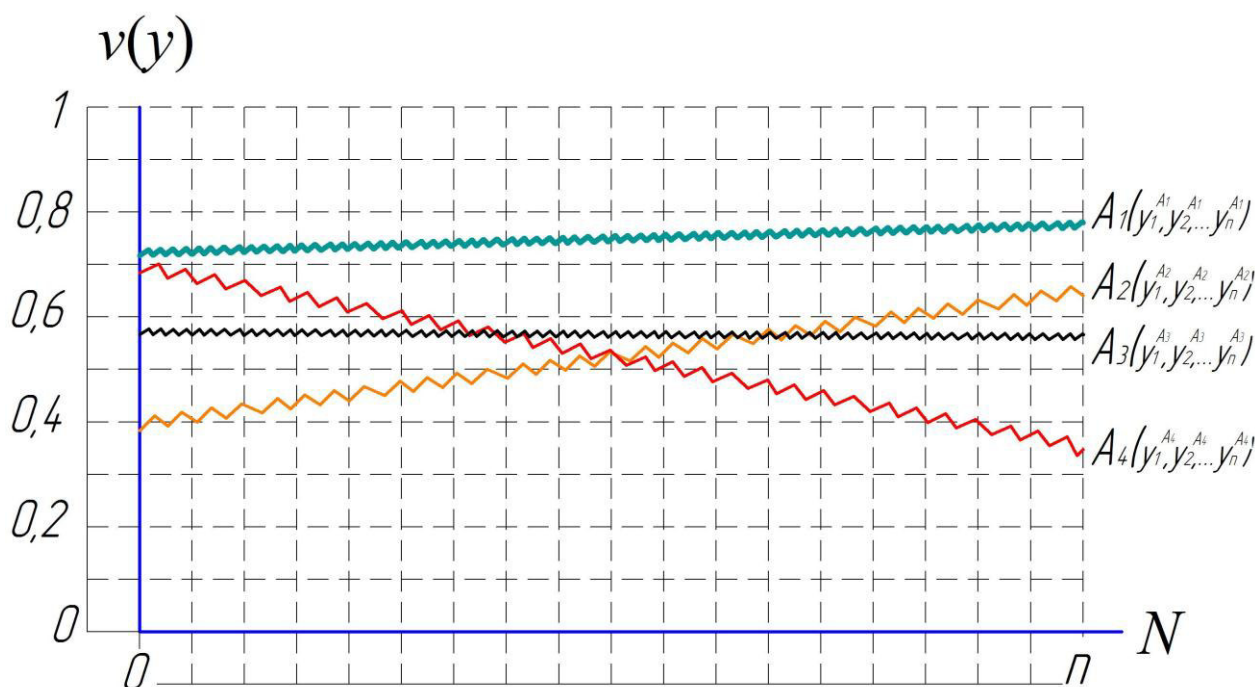


Рис. 2.7. Многокритериальные оценки альтернатив для множества вариантов предпочтений ЛПР относительно ценности оценок альтернатив

На рис. 2.7. представлен пример возможных результатов многокритериального анализа для четырёх альтернатив: A_1 , A_2 , A_3 , A_4 при интервально заданных ценностях с помощью предлагаемой методики (рис 2.4). На рисунке представлены характерные случаи:

1. Доминирование альтернативы при любых вариантах предпочтений ЛПР – альтернатива A_1 .
2. Неустойчивые альтернативы – A_2 и A_4 .
3. Устойчивая альтернатива A_3 .

Угол наклона графиков показывает степень чувствительности альтернатив к изменениям ценности оценок по критериям. Самые нестабильные альтернативы имеют сильный наклон вниз или вверх. Соответственно, при выборе, необходимо с осторожностью относиться к выбору альтернатив, с нестабильными графиками многокритериальной оценки.

В полученных результатах уже заложен анализ чувствительности к изменениям предпочтений ЛПР в отношении ценности оценок по критериям. Это становится возможным вследствие дополнения этапа 2 при построении

однокритериальных функций ценности и внедрения этапа 3 (рис. 2.4) – «Разбиение интервалов на множество оценок с формированием группы однокритериальных функций ценности» и (рис. 2.4).

Полученные результаты ставят следующие задачи: анализ полученных многокритериальных оценок, интерпретация графиков, выбор лучшей альтернативы, отбор нескольких альтернатив или их ранжирование (этап 6, рис. 2.4).

Для решения данных задач автор предлагает ранжировать районы по среднему значению многокритериальных функций полезности (ценности) относительно всех вариантов предпочтений ЛПР, таким образом, выбирая наиболее перспективные альтернативы. При близких средних значениях многокритериальных функций можно воспользоваться коэффициентом устойчивости альтернативы, чтобы выбрать наиболее стабильный вариант.

1. Среднее значение оценок многокритериальных функций для всех вариантов предпочтений ЛПР по каждой альтернативе:

$$\langle v \rangle (y_q) = \frac{\sum_{k=1}^n v_k(y_q)}{n} \quad (2.8)$$

где y_q – вектор оценок по критериям альтернативы q ; $v_k(y)$ – многокритериальная функция ценности, соответствующая k -му варианту предпочтений ЛПР.

Среднее значение оценок многокритериальных функций альтернативы покажет её эффективность с учетом всех возможных вариантов предпочтений ЛПР.

2. Коэффициент устойчивости альтернативы:

$$K_i^{уст} = \frac{v_{max}(y)}{v_{max}(y) - v_{min}(y)} \quad (2.9)$$

где $v_{max}(y)$ – максимальное значение МФЦ по данной альтернативе, $v_{min}(y)$ – минимальное значение МФЦ по данной альтернативе.

Коэффициент устойчивости показывает, насколько сильно меняются многокритериальные оценки альтернативы в зависимости от различных вариантов предпочтений ЛПР. Чем больше $K_i^{уст}$, тем большая устойчивость у альтернативы.

При сравнении альтернатив с близкими значениями $v(y)$ следует отдать предпочтение варианту с большим $K_i^{уст}$.

Таким образом, на основе многокритериальной теории полезности, автором предложена методика выбора района для размещения ВЭС. В дополнение к данной методике для реализации всех необходимых расчётов с участием автора разработана программа для ЭВМ [210] (см. гл. 3).

Методика формализует последовательность и процедуры анализа, открыта для изменения структуры целей, критериев и субкритериев.

2.3. Разработка методики многокритериального выбора площадок для размещения ВЭС

2.3.1. Формулировка задачи многокритериального выбора площадок размещения ВЭС

Задача выбора площадок формулируется автором аналогично задаче многокритериального выбора района размещения ВЭС (см. параграф 2.1.1). Существует множество альтернатив выбора $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, которыми являются площадки размещения ВЭС. Для их оценки сформировано множество критериев $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, которые могут состоять из множества субкритериев $S = \{s_1, s_2, \dots, s_p\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом многокритериальных оценок альтернатив по критериям множества F .

При формировании целей автором предлагается учитывать следующие факторы:

1. Экономические факторы.
2. Факторы, связанные с окружающей средой.
3. Фактор удобства обслуживания и монтажа.

Целью, отражающей экономический фактор, может являться максимизация ЧДД проекта ВЭС. Оценку ЧДД проекта ВЭС необходимо проводить с учетом рельефа местности и результатов моделирования ветрового потока.

Целью, отражающей фактор воздействия на окружающую среду, может являться минимизация антропогенного воздействия на флору и фауну. Различные земли, рассматриваемые в качестве потенциально возможных площадок для ВЭС, могут иметь различную ценность, например чернозёмные земли для сельскохозяйственных нужд, кустарники, леса и т.д. Соответственно, наиболее благоприятным случаем является размещение ВЭС на землях с меньшей ценностью для различных нужд.

Целью, отражающей фактор удобства обслуживания и монтажа, может стать минимизация расстояния до объектов транспортной инфраструктуры и максимизация доступности площадки для обслуживания.

При выборе площадки размещения ВЭС наиболее важным является определение локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала с учетом рельефа местности и розы ветров. Зависимость выработки энергии ВЭС и экономической эффективности проекта от этих аспектов очень высока. Рассмотрим предлагаемую методику определения площадок с высоким ветроэнергетическим потенциалом.

2.3.2. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала

В первой главе были отмечены недостатки существующих методических подходов при решении задачи определения экономической эффективности применения ВЭС. Одним из направлений совершенствование схемы исследований по оценке экономической эффективности применения ВИЭ (рис. 1.4, 1.5) предлагался учёт влияния рельефа местности при определении экономической эффективности проекта.

В соответствии с формулой, энергия воздушного потока E (Дж) имеет вид [55, 104, 200, 216]:

$$E = \rho v^3 \cdot \frac{F}{2} \quad (2.8)$$

где ρ - плотность воздуха, кг/м^3 , v - скорость ветра, м/с , F - поперечное сечение воздушного потока, м^2 .

Как видно из формулы, кубическая зависимость вырабатываемой энергии от скорости ветра обуславливает большую роль скорости ветра в выработке электроэнергии. Даже сравнительно небольшое изменение скорости ветра, например от 3,5 до 4 м/с уже вносит существенные коррективы в суммарную выработку электроэнергии. Скорость ветра в большой степени зависит от рельефа местности. Локальные потоки ветра усиливаются за счёт эффекта струйных течений [193, 168]. Например, при среднегодовой скорости ветра (в большом масштабе территории) 7 м/с можно найти области со скоростями ветра, например от 4,5 м/с до 8 м/с соответственно.

Для учёта влияния рельефа местности на скорость ветрового потока автором предлагается методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала. На рисунке 2.8 представлены этапы данной методики. На всех этапах возможно применение различных программных продуктов и использование различных исходных данных, эти особенности описаны в параграфе 1.3. Также автор выделил два варианта расчёта, для

возможности оценки площадок с использованием статистически необработанных (рис. 2.8, пункты 5.1, 6.1) и обработанных данных (рис. 2.8, пункты 5.2, 6.2).

При первом варианте (рис. 2.8, пункты 5.1, 6.1) производится более точный расчет, на основе которого целесообразна дальнейшая оценка выработки электроэнергии ВЭУ и анализ экономической эффективности площадки. Используемая при этом разработанная с участием автора программа для ЭВМ описаны в главе 3. Результатом анализа является значение ЧДД для каждой потенциальной площадки. В дальнейшем ЧДД используется для многокритериального выбора площадки (см. параграф 2.3.3) в качестве одного из критериев.

При втором варианте расчёта (рис. 2.8, пункты 5.2, 6.2) можно предварительно оценить ветроэнергетический потенциал площадок с учётом рельефа местности и розы ветров на основе аэродинамического моделирования без использования дополнительного программного обеспечения. Результатами анализа будут являться значения предлагаемого автором показателя, характеризующего эффективность площадки для размещения ВЭС. Сравнивая значения данного показателя можно выполнить ранжирование площадок по эффективности.

Под площадкой будем понимать конечные замкнутые области, на которые происходит разбиение трёхмерного пространства при CFD моделировании или условное разделение ЛПР исследуемого района на определённое количество участков.

Рассмотрим этапы более подробно:

1	Формирование исходных данных	
2	Предварительный анализ и выбор районов для размещения ВЭС	
3	Построение трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района	
4	Аэродинамическое моделирование. Определение коэффициентов изменения скорости ветра по направлениям ветра	
5	5.1 Формирование массива уточненных скоростей ветра с учётом K_i^d	5.2 Определение эффективности площадки по 8 направлениям с учётом K_i^d
6	6.1 Экономический анализ по уточнённым скоростям ветра	6.2 Определение перспективных площадок по коэффициенту R_{Σ}

Рис. 2.8. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала

1. Формирование исходных данных

На первом этапе формируется база исходных данных. Автор выделил два варианта выбора перспективных зон, отличающихся степенью детализации, поэтому исходные данные будут отличаться:

- расчёт на основании статистически необработанных данных (5.1; 6.1). Массив данных о скоростях V_i и направлениях ветра d_i в i -ые моменты времени за рассматриваемый период;

- на основании статистически обработанных данных (5.2, 6.2). Среднегодовые скорости ветра $V_{ср}^d$, м/с по 8 направлениям и повторяемости ветра по 8 P^d направлениям за рассматриваемый период в районе, где d (от англ. «direction» – направление) – одно из восьми направлений ветра: С, С-В, В, Ю-В, Ю, Ю-З, З, С-З.

2. Предварительный анализ и выбор районов для размещения ВЭС.

«Предварительный анализ и выбор районов для размещения ВЭС» описан ранее и основывается на предложенных методиках (рис. 2.1, 2.4). Целью этапа является выбор нескольких наиболее перспективных районов для трехмерного моделирования и аэродинамических расчетов. Количество районов

определяется имеющимися вычислительными и информационными ресурсами, ресурсами времени.

3. Построение трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района.

На третьем этапе подготавливается трёхмерная модель рельефа для выбранного пакета вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics).

На этом этапе производится выбор исходных данных для построения 3d модели. Существуют различные базы данных рельефа местности с их особенностями для различных районов Земли. В данных часто содержатся различные ошибки, неточности, нехарактерные резкие перепады высот в рельефе местности, поэтому часто проводится их корректировка. Также, при моделировании желательно использовать масштаб рельефа местности 1:1, что позволит получить более точные результаты, однако это требует соответственно больших ресурсов вычислительной техники. Размер области построения и её детализация определяется на основании доступных вычислительных ресурсов и целесообразной возможной удаленности ВЭС от центра электрических нагрузок.

В результате будет сформирована трёхмерная модель исследуемой местности для CFD анализа.

4. Аэродинамическое моделирование.

Для получения распределения ветрового потока на исследуемом рельефе местности проводится аэродинамическое моделирование. Для полноценной оценки моделирование необходимо провести по всем направлениям соответствующим розе ветров: северо-запад, север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад.

Для этого в программу CFD анализа импортируется трёхмерная модель рельефа, задаются начальные условия (плотность воздуха, скорость и направление ветра, изменение скорости ветра с высотой, температура,

давление, модель турбулентности и др.), расчётная сетка, параметры границ и производится цикл расчёта.

Для учета эффекта изменения скорости ветра в соответствии с высотой башни ВЭУ может использоваться, например, степенной закон [104]:

$$V_i = V_{\text{нач}} \left(\frac{H_i}{H_{\text{нач}}} \right)^m \quad (2.9)$$

где $V_{\text{нач}}$ – начальная скорость ветрового потока, м/с; $H_{\text{нач}}$ – высота, при которой измерено значение скорости ветра, м; H_i – текущая высота ветрового потока, м; m – степенной коэффициент.

Температура и давление, как правило, принимаются стандартными значениями: 20 градусов Цельсия и 101325 Па.

При описании процессов турбулентности использовалась стандартная k - ϵ модель [241]. В этой модели турбулентная динамическая вязкость μ_t выражается через величины k и ϵ следующим образом:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} f_\mu \quad (2.10)$$

где C_μ – коэффициент, равный 0,9; ρ – плотность, кгм⁻³; f_μ – параметр, при стандартной k - ϵ модели равный 1.

Уравнения для k и ϵ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right) + \mu_t \cdot \left(G + \frac{\beta}{Pr_t} g \cdot \nabla T \right) - \rho \epsilon + \Phi_k \quad (2.11)$$

где V – вектор относительной скорости, м/с; μ – молекулярная динамическая вязкость, Па·с; σ_k – параметр, равный 1, Н/м; β – коэффициент теплового расширения, К⁻¹; Pr_t – турбулентное число Прандтля; g – ускорение свободного падения, вектор гравитации, мс⁻²; T – относительная температура, град.; Φ_k – параметр, в стандартной k - ϵ модели равный 0.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V\varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right) + \\ + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(G + \frac{\beta}{Pr_t} g \cdot \nabla T \right) - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \Phi_z \end{aligned} \quad (2.12)$$

где C_1 – коэффициент стандартной k - ε модели, равный 1,44; C_2 – коэффициент, в стандартной k - ε модели равный 1,92; f_1 – параметр, в стандартной k - ε модели равный 1. Φ_z – параметр, в стандартной k - ε модели равный 0.

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

где D_{ij} – коэффициент изотропного сопротивления, $\text{кгм}^{-3}\text{с}^{-1}$;

Модель течения реализована в качестве модели «Ньютоновской жидкости». Движение жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho V \times V) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau_{elf} + S + S_{user} \quad (2.15)$$

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B + R \quad (2.16)$$

$$R = -D \cdot V \quad (2.17)$$

$$B = -2\omega \times V - \omega \times \omega \times r \quad (2.18)$$

где R – сила изотропного сопротивления; D – коэффициент изотропного сопротивления; B – сумма кориолисовой и центробежной сил во вращающейся системе координат; S_{user} – пользовательская объёмная сила, τ_{elf} – тензор вязких напряжений для ньютоновской жидкости, ω – угловая скорость, с^{-1} .

Основным результатом четвёртого этапа является получение коэффициентов изменения скорости ветра под воздействием рельефа местности:

$$K_i^d = \frac{V^d}{V_{cpr}^d} \quad (2.19)$$

где V^d – скорость ветра в направлении d , полученная по результатам моделирования скорости ветрового потока; $V_{\text{срг}}^d$ – среднегодовая скорость ветра в направлении d , используемая как начальная скорость при моделировании.

На этапе 5.1 проводится уточнение скоростей ветра V_i с учетом коэффициентов K_i^d .

$$V_i^d = K_i^d \cdot V_i \quad (2.20)$$

На этапе 5.2 определяется эффективность площадки для каждого направления ветра R_i^d :

$$R_i^d = P_i^d \cdot K_i^d \quad (2.21)$$

где P_i^d повторяемость ветра в направлении d ;

На этапе 6.1 проводится технико-экономический расчет проекта ВЭС по уточненным данным о скорости ветра. Результатом расчёта является значение чистого дисконтированного дохода (ЧДД) проекта ввода ВЭС для каждой потенциальной площадки за исследуемый период. В дальнейшем ЧДД используется для многокритериального выбора площадки в качестве одного из критериев.

На этапе 6.2 проводится оценка показателя $R_{i\Sigma}$, который отражает перспективность площадки с учётом усиления скорости ветра по каждому направлению. Данный показатель рассчитывается как среднее арифметическое значение коэффициентов изменения скорости ветра по направлениям для каждой площадки:

$$R_{i\Sigma} = \frac{\sum_i R_i^d}{8} \quad (2.22)$$

Таким образом, методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала позволяет выполнить сравнение площадок для размещения ВЭУ на двух уровнях детализации:

1. На первом уровне произвести более точный расчет, позволяющий выполнить анализ технико-экономической эффективности ВЭУ на площадках.

2. На втором уровне произвести сравнение ветроэнергетической эффективности площадок с учётом влияния рельефа местности и розы ветров.

2.4. Выводы по главе 2

Во второй главе автором предложено несколько решений в рамках задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей.

1. Предложена методика многокритериального выбора района размещения ВЭС (рис. 2.1). Она позволяет провести многокритериальный анализ и выбор районов с учётом неэкономических критериев и субкритериев. Методика позволяет повысить степень формализации выбора района, улучшить процедуры поддержки принятия решений при многокритериальном выборе района. Для снижения загрузки ЛППР и возможности применения метода МАУТ в условиях большого числа критериев в методике для анализа субкритериев привлекается эвристический метод из группы SMART. На основании анализа выполняется ранжирование районов по перспективности размещения ветроэнергетических мощностей, оценки имеют численное значение, что позволяет выявить степень превосходства одной альтернативы над другой. Таким образом, повышается качество принимаемых решений за счёт системного подхода к задаче и учета значимых факторов не только экономического характера, но и социального, экологического.

2. Усовершенствована методика принятия решений на основе метода МАУТ учётом неопределённости ЛППР в отношении критериальных оценок (рис. 2.4). Методика учёта неопределённости ЛППР в отношении критериальных оценок дополняет методику выбора района, а также методику выбора площадки и может быть применена в обоих случаях. Методика направлена на решение трудностей, возникающих у ЛППР при задании точных количественных значений ценности критериальным оценкам. В результате применения методики могут быть получены многокритериальные оценки для всех вариантов предпочтений ЛППР с учетом его неопределенности. Для сравнения

альтернатив в таких условиях предложен дополнительный показатель – коэффициент устойчивости.

3. Разработана методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала (рис. 2.8), которая позволяет произвести анализ и выбор перспективных площадок для размещения ВЭС в районе. Основой методики является аэродинамическое моделирование ветрового потока на трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района.

Это позволяет выполнить поиск перспективных площадок с учётом влияния рельефа местности и розы ветров. Определение перспективных площадок с учётом влияния рельефа местности и розы ветров имеет два уровня анализа:

1) первый уровень анализа использует статистически необработанные данные многолетних наблюдений метеостанций для уточненной экономической оценки проекта ВЭС;

2) второй уровень анализа использует статистически обработанную информацию о повторяемости скорости и направления ветров в районе для выявления перспективных площадок для размещения ВЭС.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ВВОДА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

3.1. Постановка задачи

В работе были рассмотрены задачи, возникающие при вводе ветроэнергетических мощностей (рис. 1.3), для которых в первой главе (рис. 1.4, 1.6) были предложены направления совершенствования, а во второй главе были разработаны:

1. Методика многокритериального выбора района для размещения ВЭС (рис. 2.1).

2. Методика принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок (рис. 2.4).

3. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала (рис. 2.8, 2.9).

Для апробации методик применяется разработанная с участием автора программа для ЭВМ «Wind - MCA» [210] (рис. 3.1).

Исследование и апробация методик и программы для ЭВМ будет включать в себя четыре этапа:

1. Оценка районов размещения ВЭС с позиций одного критерия экономической эффективности.

2. Многокритериальная оценка районов для размещения ВЭС.

3. Многокритериальная оценка районов для размещения ВЭС с учётом размытых предпочтений ЛПР в отношении критериальных оценок.

4. Оценка экономической эффективности районов и площадок для размещения ВЭС с учётом влияния рельефа местности и розы ветров.

Для этапов 1-3 были выбраны северные территории республики Саха (Якутия), а для этапа 4 – район п. Аян Хабаровского края.

3.2. Описание программы для ЭВМ «Wind - MCA»

В современной практике решения проектных задач широко применяется программное обеспечение для экономии временных, трудовых и финансовых ресурсов. Для реализации поддержки принятия решений по размещению ВЭУ с участием автора в среде Delphi разработана программа для ЭВМ «Wind-MCA» [210] на основе предложенных во 2 главе методик. В параграфе 1.2.2 были отмечены недостатки существующих методик при определении перспективных районов для размещения ВЭС. При создании программы целью было реализация методических разработок, которые повышают качество принимаемых решений (рис.1.6, рис. 2.4-2.6).

Рассмотрим структуру программы, состоящую из 4 модулей, и их особенности (рис. 3.1).

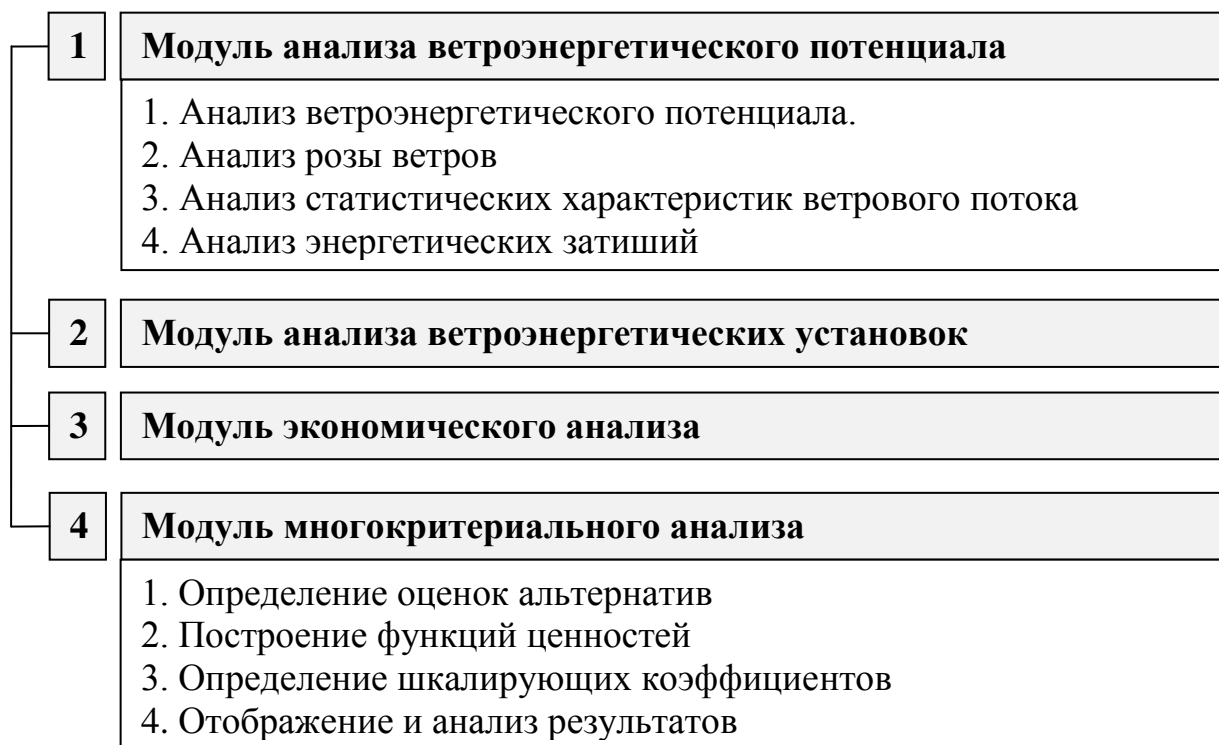


Рис.3.1. Структура программы для ЭВМ «Wind-MCA»

3.2.1 Разработка модуля анализа ветроэнергетического потенциала

Назначение модуля – анализ ветроэнергетического потенциала исследуемых районов, основных характеристик ветрового потока и сравнение ветроэнергетического потенциала районов.

Особенность модуля в отличие от программ аналогов состоит в:

- использовании статистически необработанных данных измерений с метеостанций, проводимых четыре раза в сутки, а также возможности использования статистических данных многолетних измерений;
- возможности подбора распределения функции повторяемости скорости ветра по данным метеостанций;
- анализ энергетических затиший.

Модуль включает в себя 4 подмодуля в соответствии с рис.3.2.

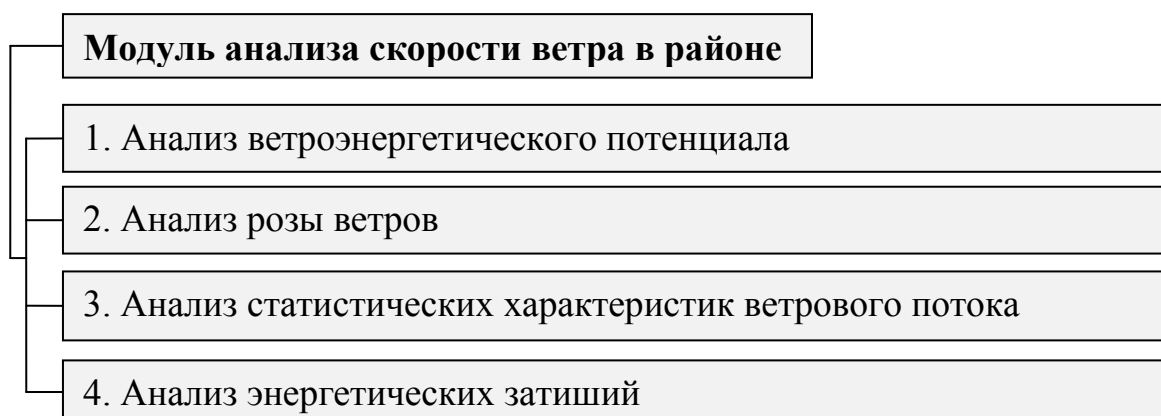


Рис.3.2. Структура модуля анализа скорости ветра в районе

Анализ скорости ветра в районе проводится на основе метеорологических данных метеостанций (скорость ветра, роза ветров), а также характера подстилающей поверхности.

Основной формой модуля является экран с графиками скорости ветра (рис. 3.3). Голубым цветом отражён график изменения величины скорости ветра в течение месяца. Для удобства отображения график разделён на две части по 15 и 16 дней.

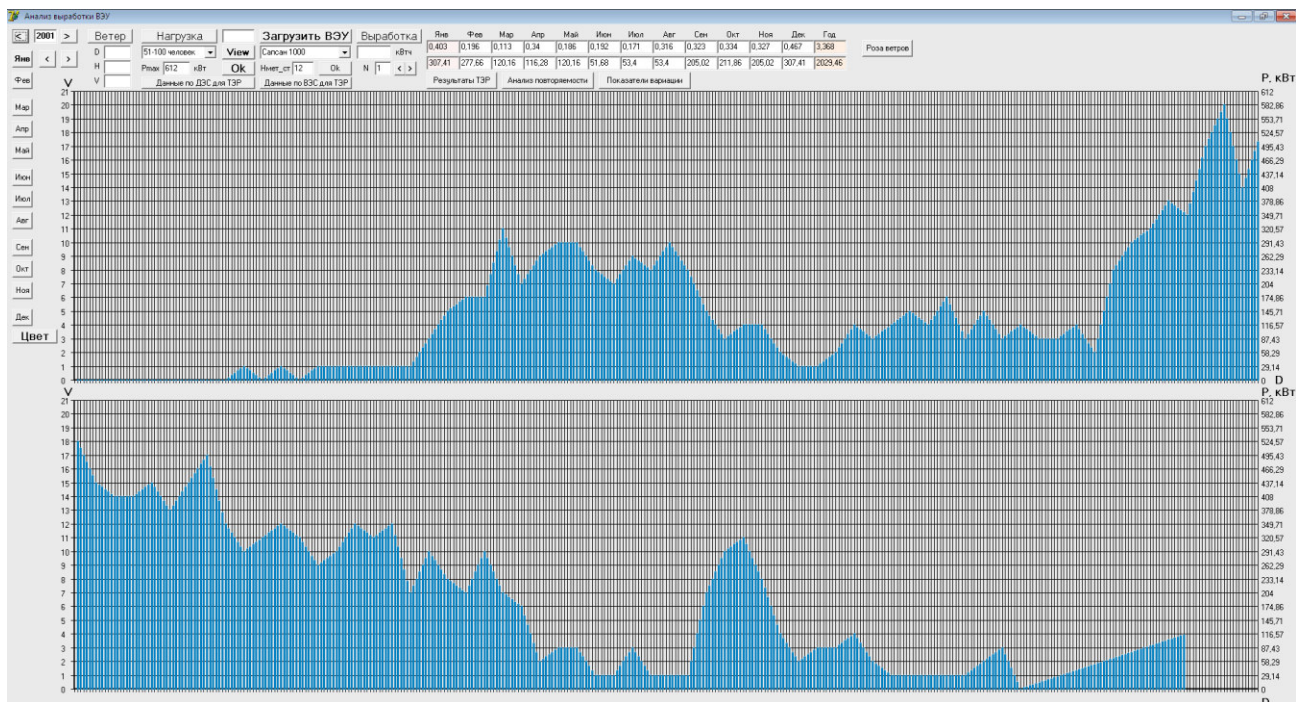


Рис. 3.3. Рабочий экран программы для ЭВМ Wind-MCA. Подмодуль анализа ветроэнергетического потенциала

При формировании метеорологических данных используются архивы измерений метеостанций, предоставляемые интернет-ресурсами, такими как gr5.ru и meteo.infospace.ru. Измерения на метеостанциях традиционно проводятся 4-6 раз в сутки, поэтому для возможности анализа скорости ветра за каждый час было принято допущение о линейном изменении скорости ветра между измерениями. При недостаточном количестве информации данные могут быть запрошены в региональных управлениях по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Также могут использоваться функции распределения скорости ветрового потока. Таким образом, в программе формируется массив данных о скорости ветра по исследуемым пунктам.

Программа позволяет выбрать месяц и год из загруженного архива метео данных. Имеется возможность цветом отразить время суток на графике для первичного визуального анализа закономерностей изменения скорости ветра (рис. 3.4).

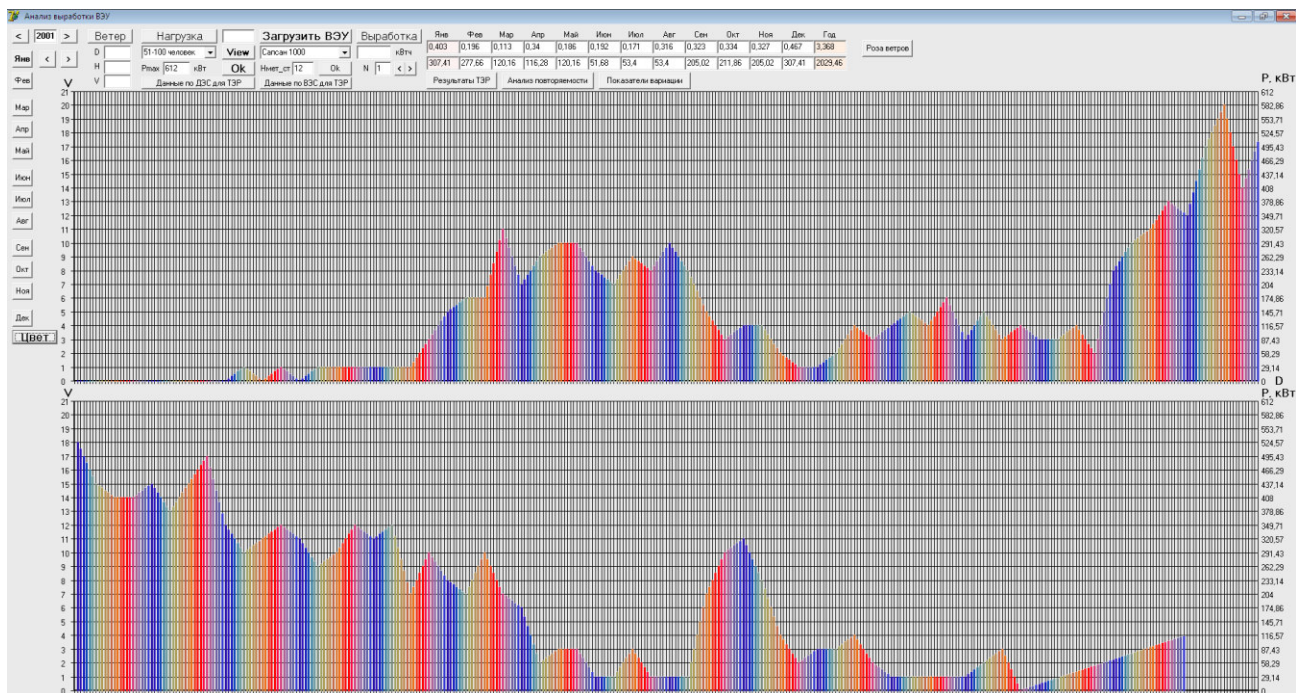


Рис. 3.4. Цветовая градация времени суток на графике скорости ветра

Форма подмодуля «Анализ розы ветров» представлена на рис. 3.5. Выявление закономерностей направлений ветра по сторонам света (рис. 3.5. а) даёт информацию для дальнейшего анализа влияния рельефа местности (см. параграф 2.3).

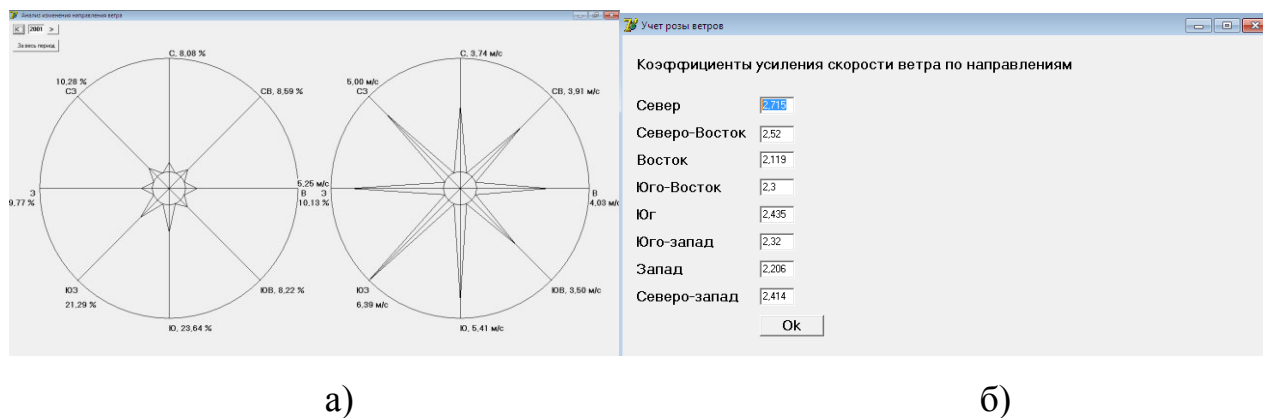


Рис. 3.5. Форма подмодуля «Анализ розы ветров»

В модуле реализована возможность учета результатов гидродинамического моделирования обтекания ветровым потоком рельефа местности при оценке ветроэнергетического потенциала (рис. 3.5 б). Выявленные коэффициенты изменения скорости ветра по каждому направлению для выбранной площадки

(см. параграф 2.3.2) можно занести в подготовленную форму, таким образом, корректируя технико-экономический расчёт.

Подмодуль анализ статистических характеристик включает две формы (рис. 3.6. и 3.7). Имеется возможность оценить средние значения скорости ветра за месяц и год в рамках объёма загруженных данных, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации.

Показатели скорости ветра

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
2001	5.34	4.35	2.85	5.06	3.95	4.48	4.22	5.11	5.03	5.55	5.3	5.77	4.87
2002	4.27	3.93	2.34	5.43	5.59	3.3	4.22	4.47	4.87	3.89	3.36	4.59	4.24
2003	5.34	5.54	5.12	3.84	4.91	4.26	4.32	5	4.13	4.58	3.89	5.5	4.8
2004	2.36	1.15	1.4	2.92	3.93	4.94	4.19	3.42	2.79	2.19	1.34	1.89	2.63
2005	1.5	1.34	2.02	3.49	4.07	4.65	3.34	4.12	3.02	4.53	0.91	1.36	2.9
2006	2.47	1.85	2.45	6.04	3.8	3.19	3.87	4.32	4.03	2.53	0.88	1.52	3.05
2007	1.56	1.65	1.54	2.97	2.43	4.3	4.76	3.17	4.12	2.36	1.67	1.19	2.73
2008	2.64	2.4	3.16	3.93	3.27	4.25	4.38	2.93	3.43	3.76	2.19	1.79	3.19
2009	2.43	0.65	2.26	2.95	4.97	3.43	4.76	2.86	2.29	1.66	2.47	1.03	2.64
2010	3.8	4.32	3.02	4.19	2.87	2.08	2.49	2.62	2.26	1.65	1.58	1.77	2.7
Всего за	3.29	2.45	2.68	4	4.06	3.98	3.99	3.8	3.6	3.36	2.26	2.77	3.37

Среднеквадратическое отклонение

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
2001	4.88	4.39	2.68	3.96	2.27	3.84	3.76	5.95	2.6	3.46	3.94	5.25	3.5
2002	3.81	3.17	1.65	3.87	3.83	2.42	2.46	2.64	2.6	4.06	3.39	4.52	3.4
2003	4.83	5.62	4.31	2.41	3.4	2.64	2.82	2.94	2.44	3.76	3.19	5.23	3.77
2004	3.93	1.86	1.8	1.66	3	3.25	2.96	2.61	2.06	1.58	1.3	2.3	2.68
2005	2.77	2.54	2.68	3.92	2.43	3.05	2.26	2.94	2.56	2.37	2.26	2.21	2.97
2006	3.13	2.85	3.09	3.56	2.11	1.94	2.37	2.29	2.71	2.68	1.49	2.44	2.9
2007	2.12	1.87	2.49	3.88	2.14	2.28	3.34	1.87	3.14	2.88	2.31	1.87	2.72
2008	2.82	2.53	3.43	3.39	2.32	2.87	3.3	2.24	2.33	3.46	2.14	2.88	3.06
2009	3.24	1.34	2.58	2.52	3.89	2.4	3.34	2.11	2.24	1.32	2.79	1.88	2.64
2010	4.89	5.84	3.91	2.99	2.61	1.88	1.84	2.43	1.93	2.06	2.24	3.46	2.86
Всего за	3.89	3.46	3.08	3.13	2.85	2.64	2.54	2.63	2.68	3.21	2.97	4.62	3.18

Коэффициент вариации

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
2001	0.91	0.98	0.94	0.79	0.57	0.81	0.82	0.5	0.52	0.62	0.74	0.91	0.72
2002	0.89	0.81	0.7	0.71	0.83	0.62	0.59	0.59	0.53	1.04	1.01	0.98	0.8
2003	0.73	0.91	0.84	0.63	0.69	0.62	0.65	0.59	0.59	0.82	1.03	0.79	0.79
2004	1.47	1.63	1.28	0.57	0.76	0.66	0.61	0.76	0.74	0.72	1.42	2.11	1.02
2005	1.73	1.89	1.33	0.87	0.6	0.65	0.68	0.71	0.65	0.65	2.48	1.63	1.02
2006	1.27	1.11	1.26	0.59	0.59	0.61	0.65	0.53	0.67	1.06	2.2	1.61	0.95
2007	1.36	1.58	1.28	0.91	0.62	0.63	0.7	0.59	0.75	0.88	1.38	1.4	1
2008	1.81	1.85	1.88	0.84	0.71	0.63	0.63	0.76	0.68	0.92	0.96	1.4	0.89
2009	1.33	2.36	1.15	0.85	0.54	0.7	0.58	0.74	0.68	0.79	1.13	1.53	1.1
2010	1.14	0.89	1.16	0.71	0.91	0.88	0.74	0.93	0.95	1.24	1.41	1.96	1.1
Всего за	1.18	1.31	1.16	0.78	0.7	0.67	0.64	0.69	0.74	0.96	1.31	1.45	0.94

Рис. 3.6. Анализ статистических показателей скорости ветра

Также подмодуль позволяет провести анализ энергетических затиший, путем расчета повторяемости при скоростях ветра ниже стартовой скорости ВЭУ. Форма подмодуля «Анализ энергетических затиший» представлена на рис. 3.7.

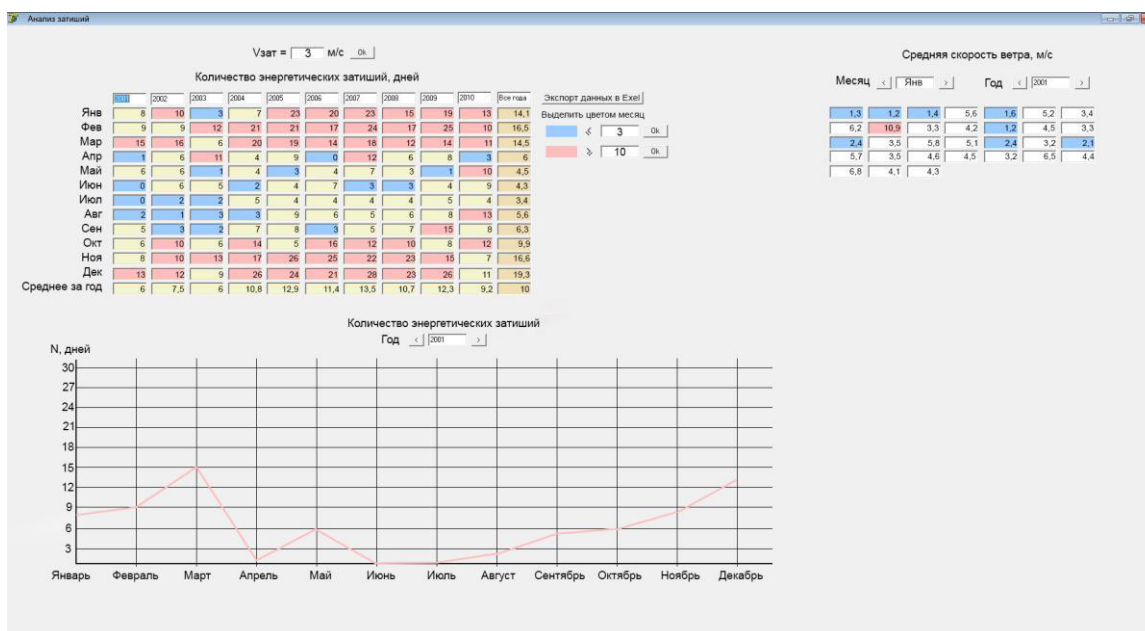


Рис. 3.7. Форма подмодуля «Анализ энергетических затиший»

Оценка количества энергетических затиший позволяет сформировать более полное представление о районе и его ветроэнергетическом потенциале, кроме того может использоваться в дальнейшем анализе. Этот параметр может быть включён в качестве критерия или субкритерия при многокритериальном выборе района для размещения ВЭС. С помощью анализа энергетических затиший можно сделать предварительное заключение о необходимых запасах энергетических ресурсов, мощности резервных источников, емкости аккумулирующих устройств при автономной работе ВЭС или совместной работы с ДЭС. Анализ энергетических затиший также является одной из особенностей программы Wind-MCA.

В целом, модуль анализа ветроэнергетического потенциала позволяет оценить перспективность района с позиций параметров скорости ветра и подобрать функции распределения скорости ветра, характерные для выбранного района.

3.2.2 Модуль анализа ветроэнергетических установок

Назначение модуля – выбор перспективных моделей ВЭУ для района, комплексный анализ мощностных характеристик ВЭУ.

Особенность модуля состоит в возможности пользователю ввести мощностные характеристики ВЭУ, по которым в дальнейшем будет производиться расчёт вырабатываемой мощности.

Модуль позволяет создать базу данных ВЭУ. Данные о ВЭУ включают в себя мощностную характеристику – зависимость вырабатываемой электрической мощности ВЭУ от скорости ветра, высоту мачты на которой расположен ротор ВЭУ, диаметр ротора, стоимость ВЭУ, срок эксплуатации.

Возможность ввода мощностной характеристики является одной из ключевых особенности разработанной программы. Многие программы аналоги в расчётах используют приближённые формулы, что отрицательно сказывается на точности получаемых результатов. Архив мощностных характеристик создаётся вручную пользователем по данным паспорта ветрогенератора в разработанном графическом интерфейсе (рис. 3.8).

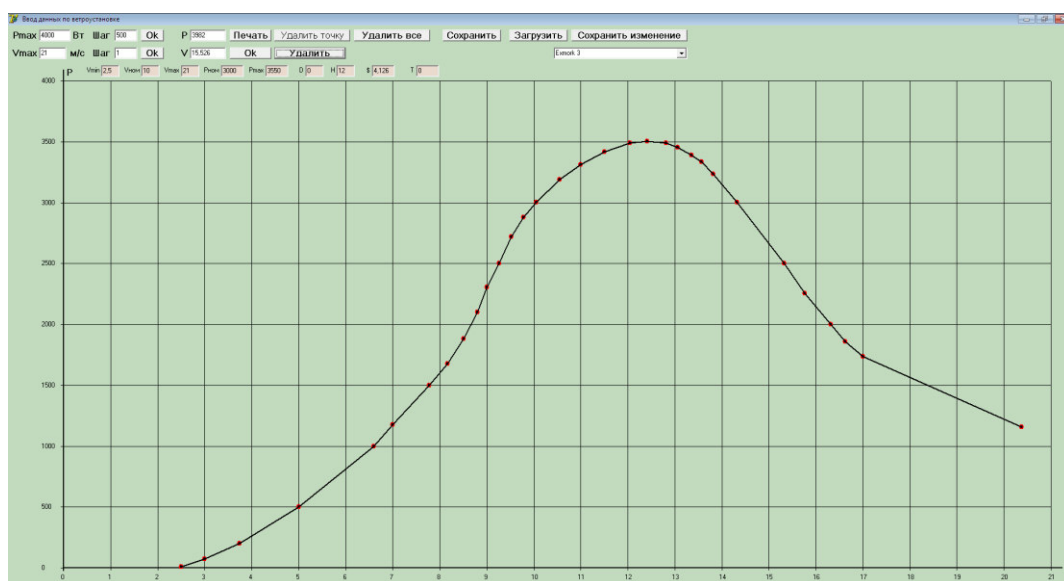


Рис. 3.8. Рабочий экран ввода данных ВЭУ

Базу данных ВЭУ можно сохранить в специальном файле, для возможности дальнейшего редактирования.

Сравнение мощностных характеристик ВЭУ представлено на рис 3.9 – мощностные характеристики созданной базы ВЭУ приведены к 1 кВт установленной мощности.

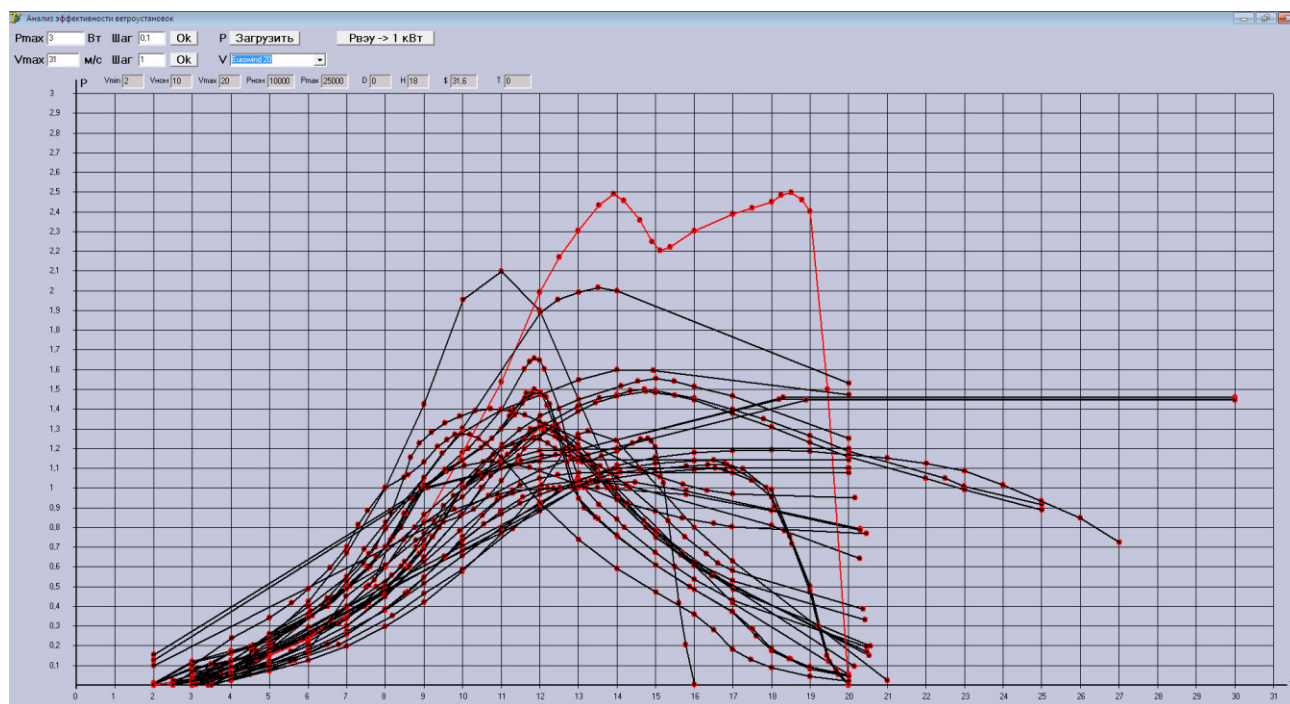


Рис. 3.9. Окно сравнения мощностных характеристик ВЭУ, приведённых к 1 кВт установленной мощности

Приведение к 1 кВт установленной мощности выполняется по формуле:

$$f(V) = \frac{P}{P_{\text{ном}}}, \quad (3.1)$$

где P – мощность, вырабатываемая ВЭУ при скорости ветра V ; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ВЭУ.

Такое приведение позволяет наглядно оценить эффективность будущей выработки при определённых скоростях ветра и подобрать наиболее эффективные ВЭУ для данного района.

3.2.3. Модуль экономического анализа

Назначение модуля – оценка экономической эффективности применения ВЭУ путем расчета: ЧДД проекта ввода в эксплуатацию ВЭУ, срока окупаемости ВЭУ, экономии топлива и масла при работе совместно с ДЭС.

Особенность модуля состоит в использовании суточных сезонных графиков электрической нагрузки населенного пункта, вместо коэффициента разновременности при расчёте востребованной электроэнергии, что позволяет более точно оценить её количество.

Экономическая эффективность использования ВЭУ в программе оценивается ЧДД за счёт сэкономленного дизельного топлива и масла при работе совместно с ДЭС:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T (\mathcal{E}_t^{\text{ГСМ}} - \text{И}_t) (1+r)^{-t} - \text{К}, \quad (3.2)$$

где T – расчетный период; $\mathcal{E}_t^{\text{ГСМ}}$ – экономия ГСМ ДЭС за год t , тыс. руб; И_t – издержки, связанные с эксплуатацией ВЭУ, в год t , тыс. руб; r – норма дисконта, принятая 0,1; К – капитальные вложения в ВЭУ, тыс. руб.

$$\mathcal{E}_t^{\text{ГСМ}} = \Delta B_t^{\text{топл}} \text{Ц}_t^{\text{топл}} + \Delta B_t^{\text{м}} \text{Ц}_t^{\text{м}}, \quad (3.3)$$

где $\Delta B_t^{\text{топл}}$ – сэкономленное дизельное топливо в год t , т; $\text{Ц}_t^{\text{топл}}$ – цена дизельного топлива в год t , тыс. руб/т; $\Delta B_t^{\text{м}}$ – сэкономленное масло в год t , т; $\text{Ц}_t^{\text{м}}$ – цена масла в год t , тыс. руб/т.

Изменение цен за расчетный период определяется по формуле:

$$\text{Ц}_t = \text{Ц}_{t_0} (1 + \pi_{\text{ГСМ}})^{t-t_0}, \quad (3.4)$$

где Ц_{t_0} – цена в первый год t_0 , тыс. руб/т; $\pi_{\text{ГСМ}}$ – параметр роста цен на ГСМ.

Рост цен на ГСМ принимается по результатам анализа динамики индексов цен на приобретенные промышленным организациями дизельное топливо, например в Федеральной службе государственной статистики [65].

Ежегодные эксплуатационные издержки в программе определяются:

$$I_t = (I_t^{\text{ам}} + I_t^{\text{рем}} + I_t^{\text{пр}})(1 + \pi_u)^{t-t^0}, \quad (3.5)$$

где $I_t^{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления, принимаемые в программе в % от капитальных вложений, тыс. руб; $I_t^{\text{рем}}$ – отчисления на капитальный и текущий ремонт, принимаемые в программе в % от капитальных вложений, тыс. руб; $I_t^{\text{пр}}$ – прочие издержки, принимаемые в программе в % от капитальных вложений; π_u – параметр учета роста цен, может приниматься равным уровню инфляции.

При оценке выработки электроэнергии программа позволяет разделить ее на востребованную и невостребованную в соответствии с характерными суточными графиками электрических нагрузок потребителя, заданных пользователем для четырех сезонов.

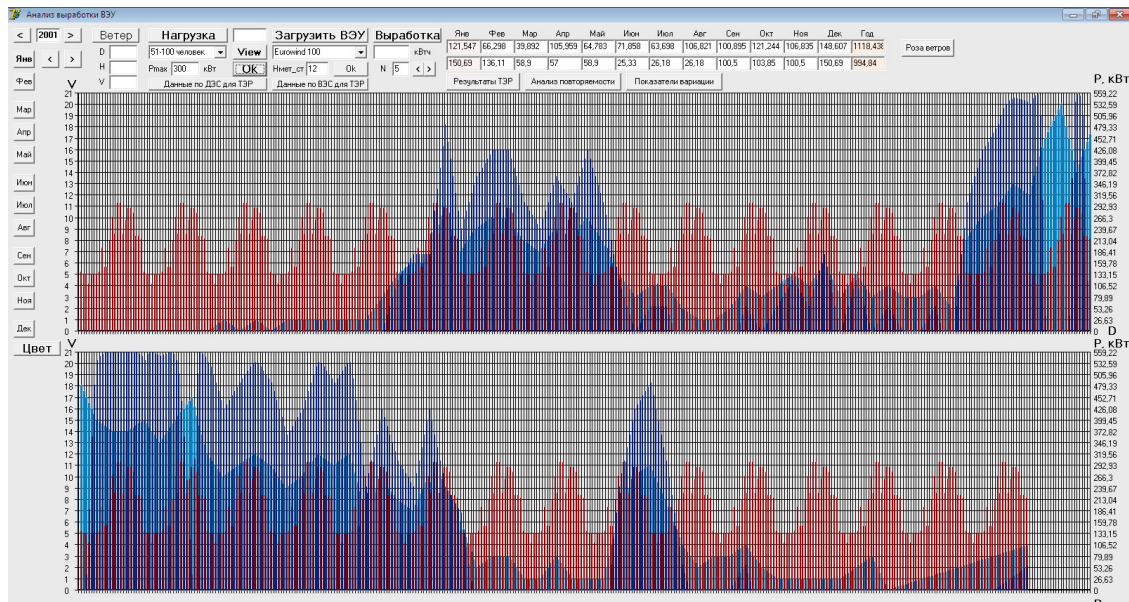


Рис. 3.10. Сопоставление графиков электрической нагрузки (красный цвет), выработки электроэнергии (синий цвет) и скорости ветра (голубой цвет)

Пример графического представления результатов экономического анализа по основным параметрам расчёта представлено в окне на рис. 3.11:

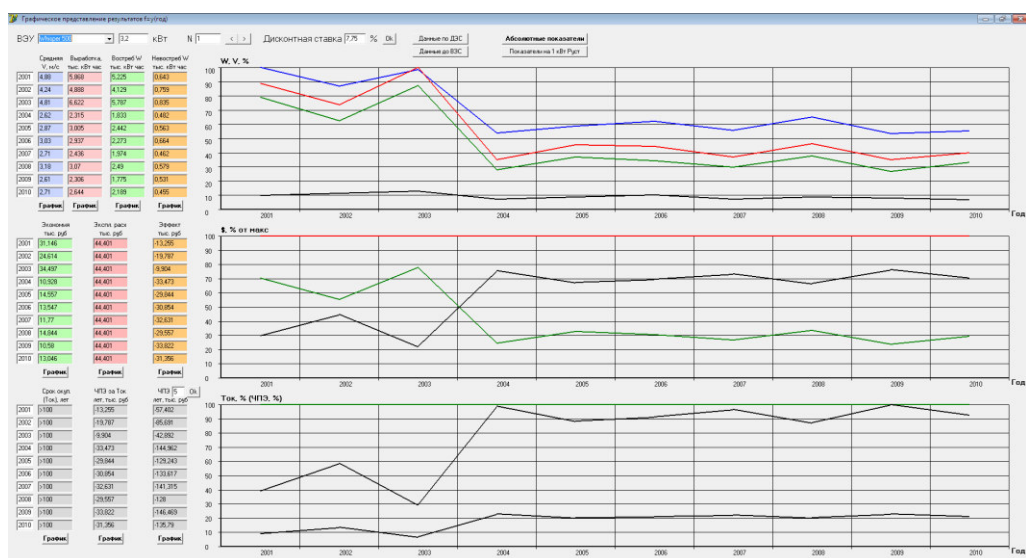


Рис. 3.11. Графическое представление результатов технико-экономического расчёта

3.2.4 Разработка модуля многокритериального анализа

Назначение модуля – оценка и ранжирование альтернатив с учетом многих критериев. Модуль реализует модификацию МАУТ, предложенную в параграфе 2.2, направленную на учет неопределенности ЛПР в отношении критериальных оценок.

Особенность модуля:

- многокритериальность и учёт неэкономических факторов при выборе перспективных районов для размещения ВЭУ;
- учёт неопределённости предпочтений ЛПР в отношении ценности критериальных оценок.

Модуль включает в себя 4 подмодуля (рис. 3.12).

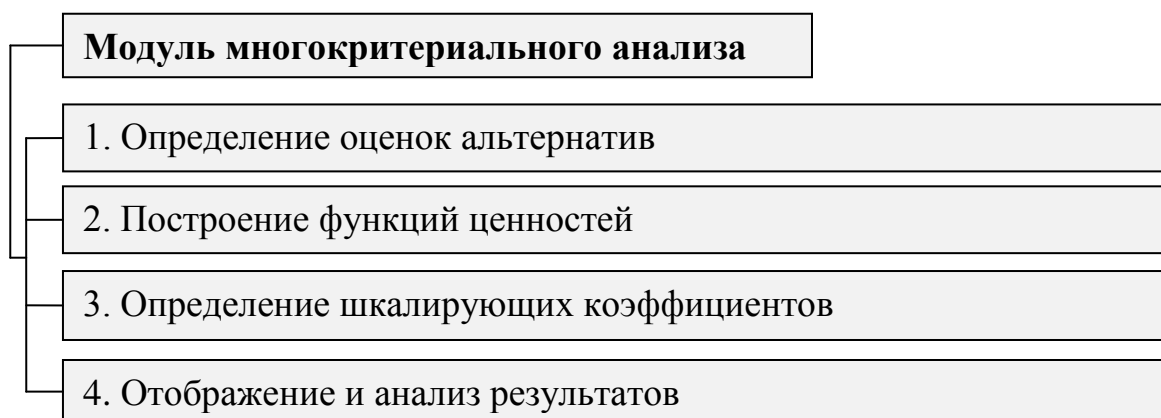


Рис. 3.12. Структура модуля многокритериального анализа.

На первом этапе выполняется ввод оценок по критериям в натуральных показателях по результатам исследований или по данным опроса экспертов по всем критериям для каждой альтернативы (рис.3.13).

Ввод оценок по критериям

Введите количество альтернатив: 10

Загрузить Ok

Альтернатива 1

< > Сохранить

K1	K2	K3	K4
42,3	9,48	0,48	0,9

Ok

Завершить

Рис. 3.13. Назначение оценок по критериям для каждой альтернативы

На втором этапе в модуле многокритериального анализа выполняется построение однокритериальных функций ценности (рис.3.14). Модуль позволяет проводить построение функций с учетом предложенной в параграфе 2.2 модификации (см. рис. 2.5, 2.6). Если ЛПР не указывает интервалы оценок, анализ будет проводиться в соответствии с классическим методом MAUT.

График функции представляет себе кусочно-линейный вид. Пользователем задаются интервалы в трёх точках излома функции, затем программа разделяет интервалы на множество оценок. Для удобства, результаты построения можно сохранить в отдельном файле.

Далее выполняется определение шкалирующих коэффициентов путем нахождения точки безразличия (рис.3.15).

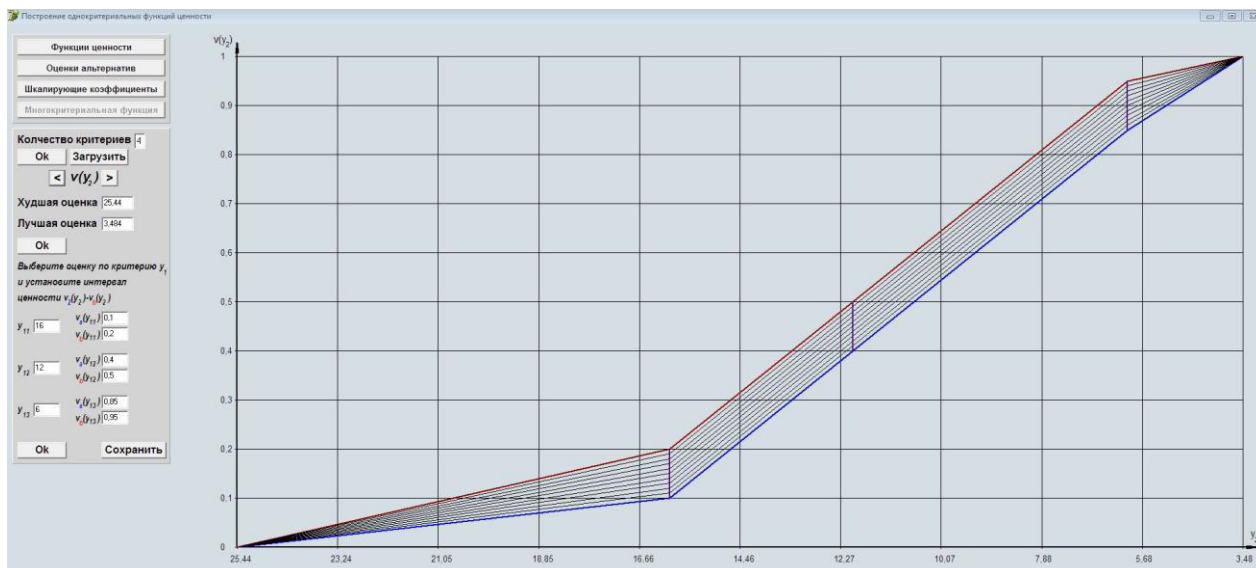


Рис. 3.14. Построение функции ценности критерия в модуле многокритериального анализа

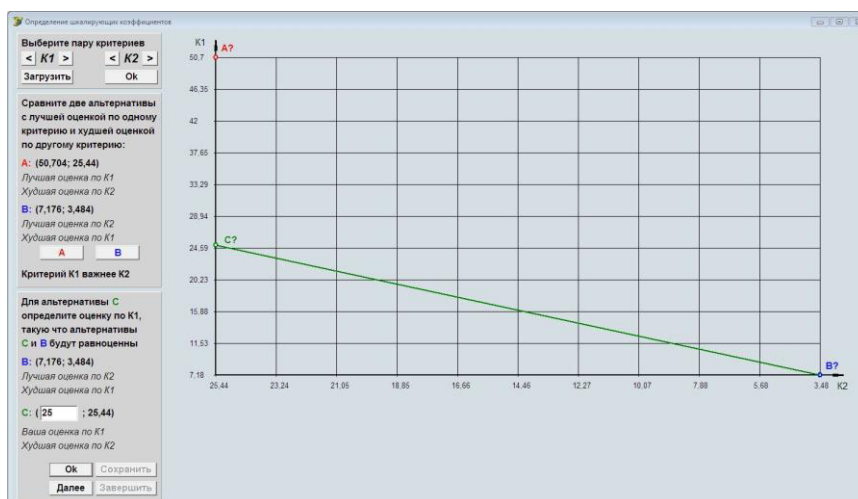


Рис. 3.15. Определение шкалирующих коэффициентов

Как уже отмечалось в параграфе 2.1, шкалирующие коэффициенты желательно определять в тех парах, где сопоставление критериев удобно ЛПР по смыслу. В программе доступен выбор любой пары критериев.

Следующим шагом является получение результатов многокритериальной оценки в графическом и табличном виде (рис. 3.16). Программа проводит автоматическое масштабирование графиков изменения многокритериальных оценок. Для большей наглядности и детального сопоставления могут быть выделены отдельные графики.

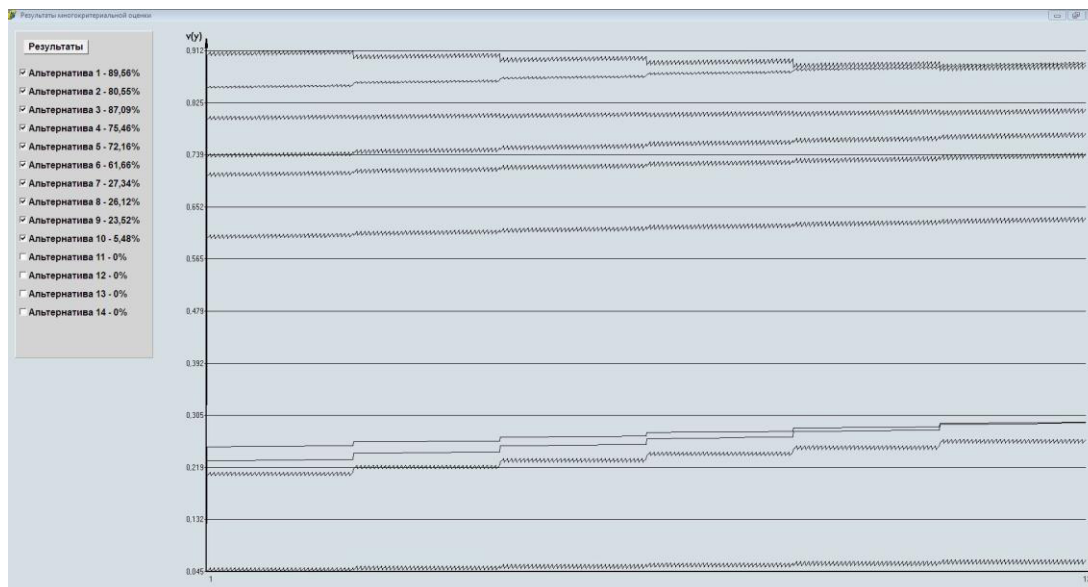


Рис. 3.16. Окно графического представления результатов
многокритериального анализа

Итак, модуль многокритериального анализа позволяет провести сравнение альтернатив на основе метода MAUT. Реализована возможность учета размытых предпочтений ЛПР в отношении критериальных оценок. Модуль позволяет на практике реализовать предложенные во 2 главе методики многокритериального анализа.

Таким образом, программа для ЭВМ «Wind-MCA» имеет следующие преимущества, отличающие её от других программ:

1. В программе реализован не только однокритериальный экономический анализ, но и многокритериальный. Многокритериальный анализ позволяет многосторонне подойти к решению задачи и учесть неэкономические факторы, а также выбрать перспективные варианты из равноэкономичных.

2. Возможность учёта неопределённости предпочтений ЛПР в отношении ценности критериальных оценок. Позволяет отразить реальную ситуацию и произвести решение задачи с учётом неопределённости ЛПР.

3. Возможность использования архивов данных измерений с метеостанций за длительный период от 10 лет и более, производившихся по четыре-шесть раз в сутки – в отличие от использования вероятностных распределений скоростей

ветра. Позволяет более точно оценить выработку электроэнергии ВЭУ и получить суточные графики изменения скорости ветра, которые можно совместить с графиками электрических нагрузок. В результате становится возможным расчёт востребованной электроэнергии с учётом графика электрических нагрузок исследуемого пункта, в отличие от использования коэффициента разновременности. Это позволяет наиболее точно определить востребованную и невостребованную электроэнергию, выработанную ВЭУ.

4. Расчёт выработки электроэнергии на основании реальных мощностных характеристик ВЭУ – в отличие от мощностных характеристик, основанных на формулах. Это также позволяет более точно оценить выработку электроэнергии ВЭУ.

5. Возможность расчёта количества дней с энергетическими затишьями – позволяет оценить объём энергоресурсов, необходимых для аккумуляирования электроэнергии, в случае длительных простоев ВЭУ.

6. Возможность учета результатов гидродинамического моделирования обтекания ветровым потоком рельефа местности позволяет уточнить оценку возможной выработки электроэнергии ВЭУ.

Применение предлагаемых методик и программы для ЭВМ на выделенных автором задачах, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей, представлено на рис. 3.17. Для первых четырёх задач в первой главе были выдвинуты предложения по уточнению технико-экономического расчёта, что отражено вертикальным блоком «Уточнение технико-экономического расчёта». Программу для ЭВМ «Wind-MCA» также возможно применить при решении первых четырёх задач.

Таким образом, предлагаемые автором методики и разработанные модули СППР «Wind-MCA» позволяют формализовать и повысить обоснованность решений задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей. Это важно, с учетом того, что в этих задачах проявляется высокая степень участия человека, его субъективного мнения. Реализация методик в программе для ЭВМ позволяет провести анализ достаточно быстро, точно и наглядно.

Задача		Поддержка принятия решения	
I	Выбор района для ввода ветроэнергетических мощностей	Уточнение технико-экономического расчёта	Методика многокритериального выбора района размещения ВЭС.
			Методика принятия решений на основе метода МАUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок.
			Программа для ЭВМ «Wind MCA»
II	Оценка эффективности использования ВЭС в районе для выбора типа электростанции в районе		Программа для ЭВМ «Wind MCA»
III	Выбор моделей, количества и мощности ВЭУ		Программа для ЭВМ «Wind MCA»
IV	Выбор площадки для ВЭС		Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала.
			Методика принятия решений на основе метода МАUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок.
		Программа для ЭВМ «Wind MCA»	

Рис. 3.17. Предлагаемые автором решения в рамках задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей

3.3 Оценка экономической эффективности районов размещения ВЭС

Этот этап исследования является составной частью многокритериального анализа выбора района для размещения ВЭС. Будем рассматривать лишь один критерий – критерий экономической эффективности. Экономическая эффективность районов размещения ВЭУ оценивалась с помощью программы «Wind-MCA». Порядок расчёта представлен на рис.3.18:

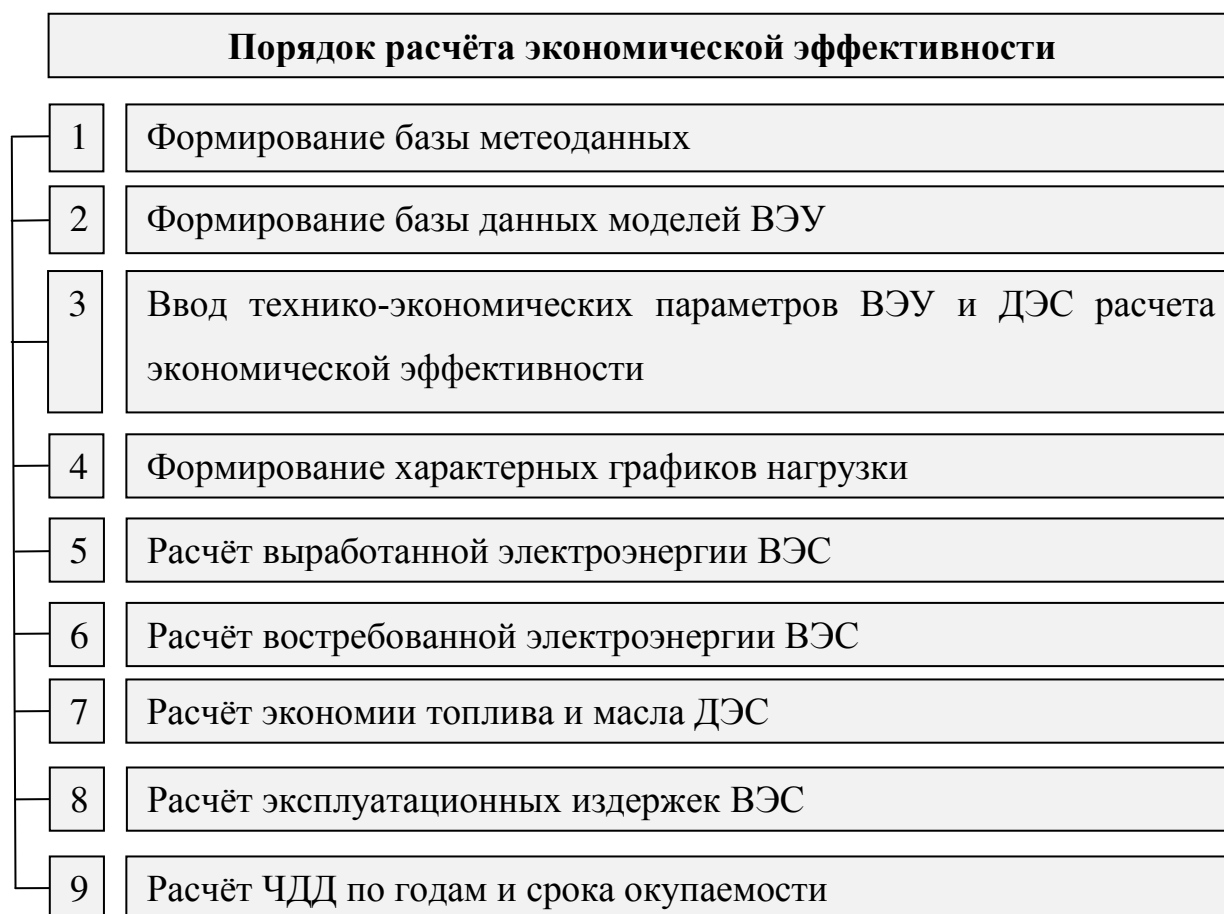


Рис. 3.18. Порядок расчёта экономической эффективности

Для апробации методики были выбраны северные территории республики Саха (Якутия). Основная часть северных районов республики Саха (Якутия) находится вне зоны централизованного электроснабжения. Современная ситуация характеризуется высокой степенью износа энергетического оборудования, ограниченным использованием местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе нетрадиционных, высокой сложностью и стоимостью завоза топлива для многочисленных ДЭС [84, 73, 107].

Высокий ветроэнергетический потенциал Севера республики Саха (Якутия) (рис. 1.1) позволяет поставить задачу оценки эффективности использования ВЭУ в энергохозяйстве, выбора наиболее перспективных районов для размещения ВЭУ.

В начале, в соответствии с методикой многокритериальной оценки районов размещения ВЭС (рис. 2.1, этап 2) формируется набор альтернатив.

Альтернативы формируются исходя из наличия потребителей электрической энергии. Такими потребителями являются населённые пункты в северных районах республики.

На рис. 3.19 представлены районы республики Саха (Якутия), а в таблицу 3.1 включены выбранные для дальнейшего сравнения районы с метеостанциями, у которых имеются архивные данные о скорости ветра в течение суток по справочным данным [186] за период 1936-1960 гг. и по данным интернет-ресурсов за период 2001-2012 гг.



Рис. 3.19. Северные улусы республики Саха (Якутия) – выделены цветом

Таблица 3.1. Среднегодовые скорости ветра на выбранных метеостанциях в северных улусах республики Саха (Якутия)

Улус	Метеостанция	$V_{\text{сред.год, м/с}}$	
		1936-1960	2001-2011
Аллаиховский	Чокурдах	4,7	3,79
Анабарский	Саскылах	3,5	3,71
	Юрунг-Хая	4,3	4,89
Булунский	Кюсюр	4,1	3,3
	Тикси	5,1	4,77
	Усть-Оленёк	6,3	4,81
Нижнеколымский	Черский	3,5	2,85
Усть-Янский	Казачье	3,3	3,23

В пределах 100 км от метеостанций находятся различные населённые пункты, которые были выбраны для дальнейшего анализа: Кюсюр, Тикси, Таймылыр, Саскылах, Юрунг-Хая, Чокурдах, Казачье, Хайыр, Черский, Оленегорск, Усть-Оленёк, Быковский, Найба. Для каждого из пунктов были сделаны поправки с учётом разницы в классе открытости местности близлежащей метеостанции и в районе самого населённого пункта.

На втором этапе формируется база моделей ВЭУ для расчёта. Для сравнения эффективности во всех пунктах была выбрана одна ВЭУ – NP-100 [228], номинальной мощностью в 100 кВт, стоимость которой на сентябрь 2015 года составляла 16 480 200 рублей. Её мощностная характеристика, высота установки ротора ВЭУ (37 м), стоимость были внесены в программу для ЭВМ Wind – МСА. Мощность ВЭУ была выбрана исходя из ограничений – в случае самых маленьких средних сезонных нагрузок, мощность ВЭУ не должна превышать 30% от мощности потребления эл. энергии. Предполагается, что ВЭУ будет работать совместно с дизельными генераторами Г-72 с расходом топлива 223,2 г/кВт·ч и масла 1,22 г/кВт·ч.

Рост цен на ГСМ принят по результатам анализа динамики индексов цен на приобретенные промышленными организациями дизельное топливо (таблица 3.2). Также при расчёте были учтены различия в уровне цен на дизельное топливо в районах. Средний индекс цен за период 2005-2014 составляет 114,4.

Таблица 3.2. Индексы цен на дизельное топливо (на конец периода, в процентах к концу предыдущего периода)

Год	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Индекс цен	139,2	108,4	114,6	115,5	99,7	103,9	133,3	107,2	108,2	114,0

Графики суточных электрических нагрузок пунктов (рис. 3.20), рассматривались с учётом характерных особенностей северных районов и небольшого числа жителей (до 3000 человек) [84].

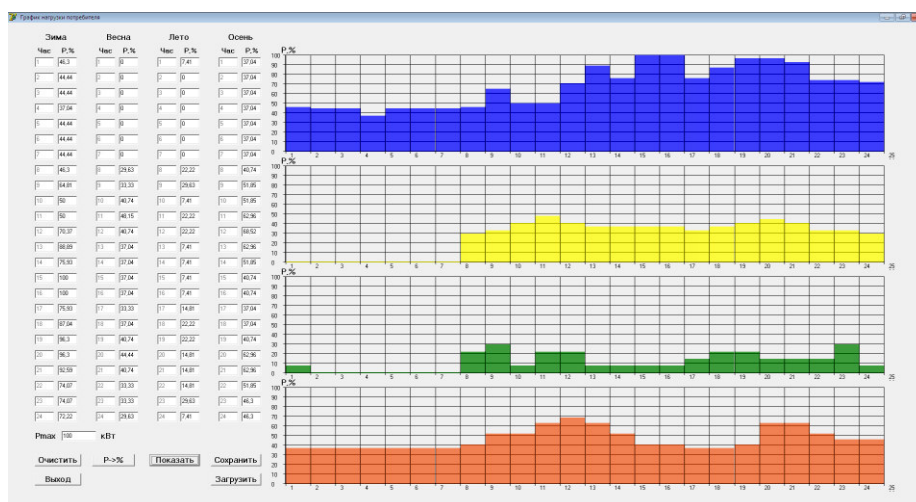


Рис. 3.20. Пример суточных графиков нагрузки исследуемого пункта

Далее, на 5-9 этапах (рис. 3.18) производился экономический расчёт в соответствии с формулами 3.3-3.6. В первую очередь определялась выработанная, а затем востребованная энергия, на основании которой производился дальнейший расчёт. Результаты расчёта выработанной и востребованной электрической энергии для двух пунктов отражены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Расчёт выработанной и востребованной эл. энергии для п. Быков мыс и Хайыр за 2001-2012 гг.

Пункт	Быков мыс				Хайыр			
	V_B	P	$P_{\text{востр}}$	$P_{\text{востр}}$	V_B	P	$P_{\text{востр}}$	$P_{\text{востр}}$
Год	м/с	тыс. кВт·ч	тыс. кВт·ч	%	м/с	тыс. кВт·ч	тыс. кВт·ч	%
2015	4,85	237,64	231,54	97,43	3,86	141,47	125,60	88,78
2016	4,34	199,89	193,60	96,85	3,33	101,21	85,08	84,07
2017	5,40	289,07	279,64	96,74	3,82	136,53	119,86	87,79
2018	3,84	153,84	147,43	95,83	3,29	96,44	82,59	85,64
2019	4,95	239,55	235,18	98,18	2,48	38,56	37,07	96,15
2020	5,20	255,62	248,92	97,38	3,43	99,28	90,08	90,74
2021	4,90	242,84	236,19	97,26	3,40	107,06	81,01	75,67
2022	5,10	238,32	234,12	98,24	2,78	75,82	60,72	80,09
2023	4,40	189,99	184,37	97,04	2,96	81,26	65,24	80,29
2024	4,67	205,60	199,37	96,97	3,09	89,92	74,69	83,07
2025	4,93	229,90	223,77	97,33	2,77	72,49	53,27	73,48
2026	4,40	196,11	191,48	97,64	3,09	81,83	70,57	86,23

Результаты расчёта можно также представить на графике – рис. 3.21.

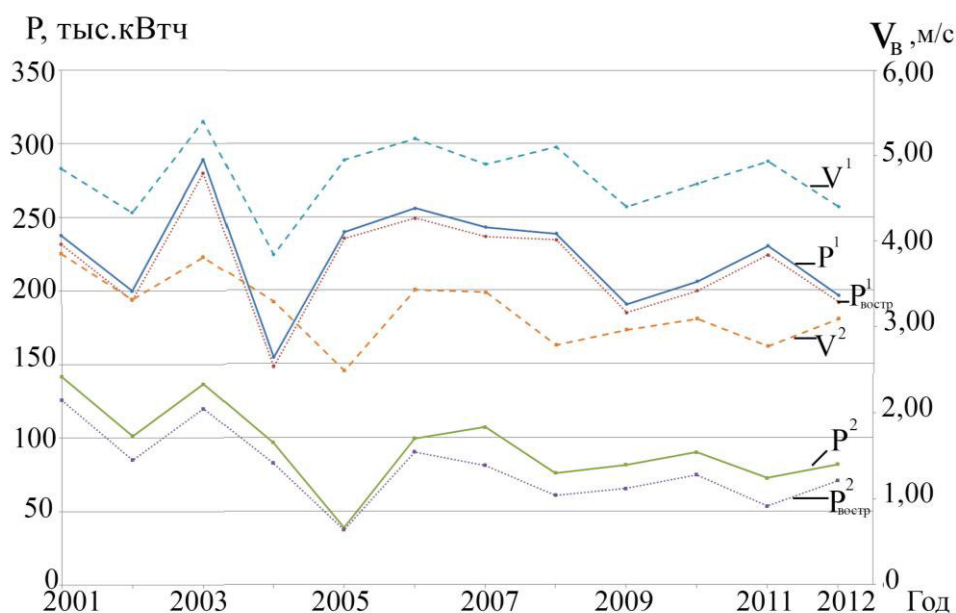


Рис. 3.21. Расчёт выработанной и востребованной эл. энергии для п. Быков мыс и Хайыр за 2001-2012 гг. Индексом 1 обозначены данные по п. Хайыр, а индексом 2 – по п. Быков мыс

Как видно из графика и таблицы при ВЭУ в единичном количестве и мощности в 100 кВт практически вся выработанная энергия – востребованная. Также подтверждается, что даже небольшое отличие среднегодовой скорости ветра существенно влияет на конечную выработку эл. энергии.

На седьмом этапе (рис. 3.22) проводится расчёт сэкономленного топлива и масла в соответствии с формулой 3.4.

На заключительном, девятом этапе (рис. 3.18) производится расчёт ЧДД и сроков окупаемости ВЭУ в выбранных районах. Пример возрастания ЧДД в течение срока работы ВЭУ для некоторых пунктов расчёта представлен в таблице 3.4. Жирным цветом выделены ЧДД в год, когда ВЭУ окупала затраты.

Таблица 3.4. Чистый дисконтированный доход с течением срока работы ВЭУ

Год	Чистый дисконтированный доход, млн. руб.						
	Кюсюр	Таймылыр	Юрунг-Хая	Сайылык	Казачье	Усть-Оленёк	Найба
2015	-15,51	-14,89	-16,09	-16,77	-15,97	-14,61	-15,30
2016	-14,77	-13,43	-15,58	-17,10	-15,78	-12,89	-14,35
2017	-13,37	-11,08	-15,03	-17,28	-15,17	-10,18	-12,46
2018	-13,29	-9,89	-14,36	-17,57	-14,92	-8,75	-11,76
2019	-12,90	-8,63	-12,77	-17,64	-15,30	-7,25	-10,09
2020	-12,37	-7,39	-11,01	-17,60	-14,89	-5,78	-8,09
2021	-12,04	-5,68	-9,23	-17,05	-14,32	-3,77	-6,09
2022	-11,28	-3,53	-6,90	-17,09	-14,10	-1,29	-3,98
2023	-10,82	-1,52	-4,83	-17,20	-13,74	1,05	-2,34
2024	-10,19	0,74	-2,22	-17,08	-13,18	3,67	-0,35
2025	-9,84	2,93	0,27	-17,12	-12,83	6,20	2,15
2026	-8,80	5,19	3,00	-16,84	-12,25	8,81	4,32
2027	-6,19	8,99	4,50	-16,64	-10,52	13,14	7,32
2028	-4,02	12,53	6,23	-16,52	-9,41	17,19	9,90
2029	-0,60	17,77	8,04	-16,11	-7,49	23,12	14,26
2030	0,32	20,81	10,06	-15,91	-6,26	26,60	16,35
2031	1,81	23,98	13,85	-15,29	-6,22	30,23	20,32
2032	3,58	27,09	17,97	-14,46	-4,70	33,80	24,89
2033	4,96	31,13	22,15	-12,65	-2,84	38,39	29,47

Отрицательные значения, которые остались вплоть до 2034 года означают, что эксплуатация ВЭУ так и не окупилась затраты на себя. В таблице можно уже оценить срок окупаемости ВЭУ, что является одним из экономических показателей эффективности работы ВЭУ.

Наглядно оценить разницу в скорости роста ЧДД в каждом пункте можно с помощью графика на рис.3.22.

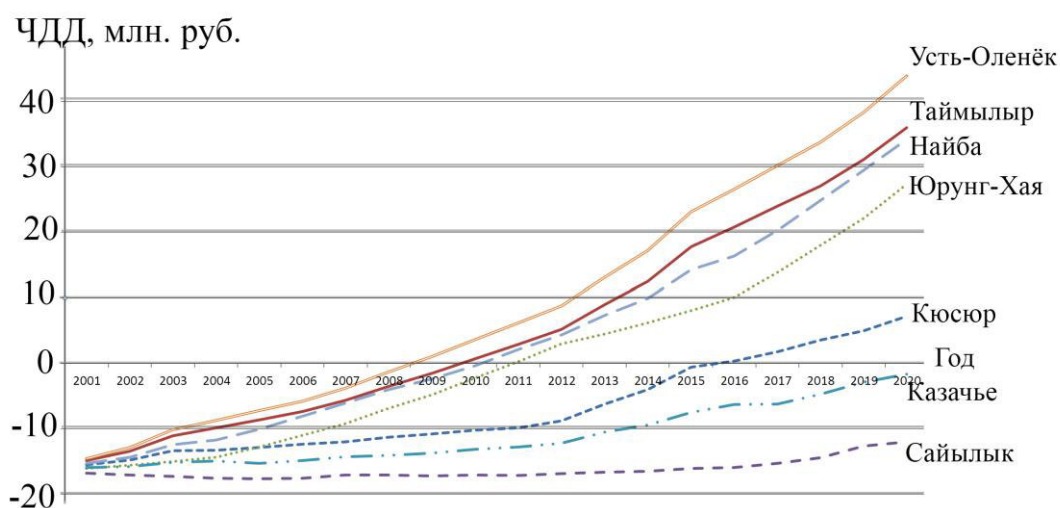


Рис. 3.22. График роста ЧДД для рассматриваемых пунктов

В таблицу 3.5 сведены основные результаты по исследуемым районам

Таблица 3.5. Результаты экономического расчёта по исследуемым районам

№	Пункт	Средняя скорость ветра (2001-2014гг.)	ЧДД к 2020 г.	Срок окупаемости
		м/с	млн.руб	год
1	Тикси	4,78	50,70	7
2	Усть-Оленек	4,82	43,90	8
3	Быков Мыс	4,78	42,36	8
4	Таймылыр	4,82	35,99	9
5	Найба	4,78	34,25	10
6	Юрунг-Хая	4,90	27,34	10
7	Саскылах	3,72	17,53	13
8	Хайыр	3,23	12,91	14
9	Чокурдах	3,79	10,77	15
10	Кюсюр	3,30	7,18	15
11	Оленегероск	3,79	-0,84	нет
12	Казачье	3,23	-1,67	нет
13	Черский	2,85	-12,12	нет

Таким образом, был проведён анализ перспективности районов и ранжирование на основании одного критерия – экономической эффективности, состоящем в чистом дисконтированном доходе в течение 20 лет работы ВЭУ.

Как видно из таблицы 3.5 в большинстве своём перспективность района, в этом случае, коррелируется со скоростью ветра, однако свои поправки вносит и учитываемая стоимость топлива в разных районах.

Для дальнейшего многокритериального анализа будут отобраны первые 10 альтернатив, поскольку, в данном случае, последние три альтернативы не окупаются в течение даже 20 лет своей работы. Однако, при определённых обстоятельствах, в случае большей важности остальных критериев, возможно включение этих пунктов в дальнейший анализ.

3.4. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭУ

Многокритериальная оценка районов размещения ВЭУ производится на основании предложенной методики в параграфе 2.1.3, рис. 2.1. Альтернативы были сформированы в предыдущем параграфе, и выбраны десять пунктов: Тикси, Усть-Оленек, Быков Мыс, Таймылыр, Найба, Юрунг-Хая, Саскылах, Хайыр, Чокурдах, Кюсюр.

Далее, в соответствии с третьим этапом (рис.2.1) формируются критерии $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ и множество субкритериев $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ip}\}$ на основании факторов, обозначенных в параграфе 2.1.1.

Иерархия выбранных целей и критериев для исследуемых пунктов отображена на рис. 3.23.

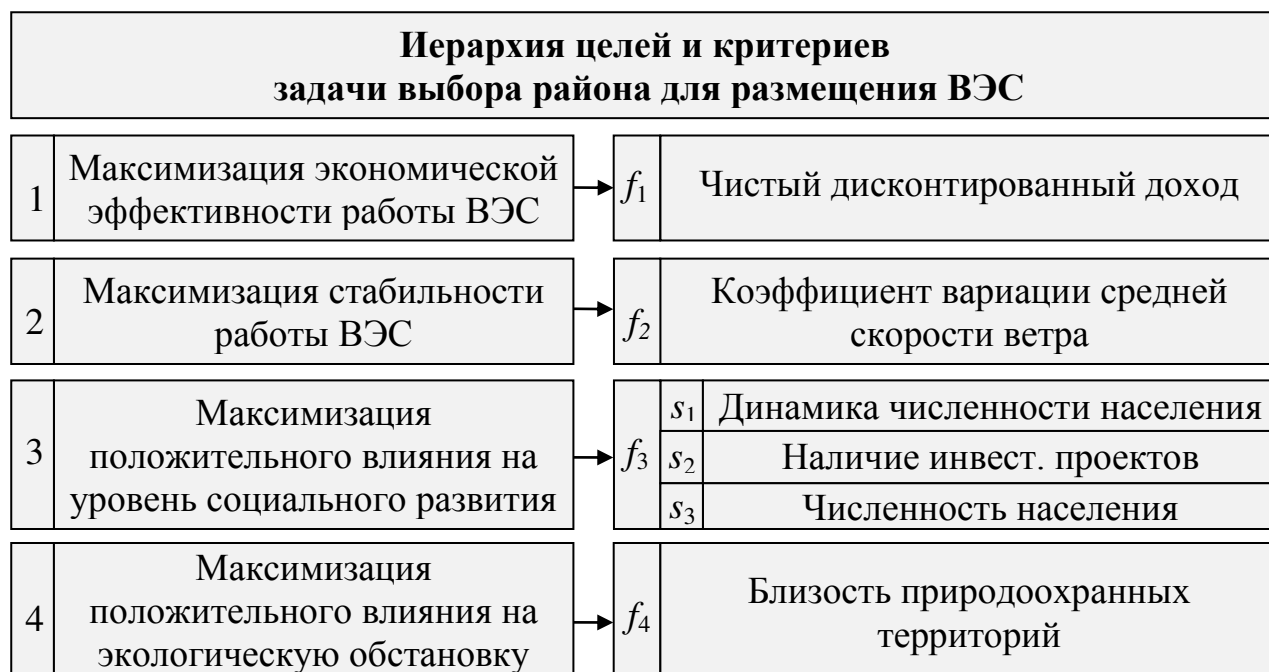


Рис. 3.23. Иерархия целей и критериев задачи выбора района для размещения ВЭС

Рассмотрим критерии и субкритерии более подробно.

1. f_1 - чистый дисконтированный доход за 20 лет работы ВЭУ – в качестве критерия, отражающего экономическую эффективность.

2. f_2 - средний за 20 лет коэффициент вариации скорости ветра – в качестве критерия, отражающего стабильность ветрового потока.

Два различных района могут иметь близкие средние годовые скорости ветра, однако отличаться коэффициентом вариации. Большие значения коэффициента вариации соответствуют большей нестабильности скорости ветрового потока, а значит и большей непостоянностью, что может означать большее количество энергетических затиший. В то время как в другом районе, возможны меньшие колебания скорости ветра, меньшие ветра при большей стабильности. Это означает, что для второго района потребуется меньшее количество возможного аккумуляирования, меньшие запасы дизельного топлива.

3. f_3 - критерий, отражающий социальный фактор разделён на три субкритерия:

а) s_1 – динамика численности населения.

Данный субкритерий характеризует критерий f_3 по перспективности применения в данном районе ВЭС. Если существует отток населения – соответственно развитие инфраструктуры района может снижаться, уменьшается и количество необходимой электроэнергии для потребителя, а значит и потребность во внедрении новых генерирующих мощностей. Изменение численности населения принято в качестве фактора, характеризующего субкритерий s_1 . Зависимость между численностью населения и оценками критерия принята линейной – чем больший процент повышения численности населения в 2018 г. по сравнению с 2002 г., тем большие оценки по критерию.

б) s_2 – наличие инвестиционных проектов развития в пункте.

Наличие инвестиционных проектов, аналогично субкритерию s_1 характеризует район с точки зрения перспективности внедрения новых генерирующих мощностей. Чем большие суммы инвестиционных проектов в районе, тем больше предполагается развитие района, а соответственно и будут необходимы новые источники электрической энергии.

б) s_3 – численность населения.

Численность населения отражает степень социального эффекта при реализации проекта ВЭС.

4. f_4 – близость природоохранных территорий – как критерий, отражающий экологический фактор.

Природоохранные территории имеют высокую значимость, поэтому критерием f_4 учитывалась удалённость исследуемого пункта от трёх ближайших природоохранных территорий. Чем ближе пункт к природоохранной территории, тем выше принимается оценка по критерию.

Согласно методике (рис. 2.1), в первую очередь определяются значения по критериям, имеющим в своём составе субкритерии. В данном случае это критерий f_3 , содержащий три субкритерия.

Проведено сравнение альтернатив по субкритериям. При определении оценок по субкритерию s_1 данные динамики численности жителей в посёлках были получены на основе результата переписи населения (табл. 3.6) и в соответствии с выбранной линейной однокритериальной функцией ценности (ОФЦ) ранжированы.

Таблица 3.6. Результаты ранжирования по субкритерию «Динамика численности населения»

Численность постоянного населения, человек			2018 г. в % к 2002 г.	Оценка по ОФЦ
Пункт	2018 г.	2002 г.		
Тикси	4537	5873	77,07	0,377
Усть-Оленек	27	52	51,92	0,000
Быков Мыс	517	363	142,42	1,000
Таймылыр	757	900	84,11	0,356
Найба	522	500	104,40	0,580
Юрунг-Хая	1147	1051	109,23	0,633
Саскылах	2317	1985	116,73	0,716
Хайыр	433	441	98,20	0,511
Чокурдах	2085	2591	80,35	0,436
Кюсюр	1345	1336	100,67	0,539

При определении оценок по субкритерию s_2 наличие крупных инвестиционных проектов учитывалось исходя из данных документов, постановлений, проектов, стратегий развития районов республики Саха (Якутия). В результате была составлена таблица 3.7 и ОФЦ для данного субкритерия (рис.3.24), получены оценки для каждой альтернативы.

Таблица 3.7. Результаты ранжирования по субкритерию «Наличие инвестиционных проектов»

Пункт	Объекты строительства	Вложения, млн. руб	Оценка по ОФЦ
Тикси	1. Развитие морских портов	25260,14	1,00
	2. Строительство оздоровительного центра «Арктика»		
	3. ПАТЭС 70 МВт		
Усть-Оленек	нет	0	0,00
Быков Мыс	нет	0	0,00
Таймылыр	нет	0	0,00
Найба	нет	0	0,00
Юрунг-Хая	1. Строительство нового жилья	15015	0,85
	2. ПАТЭС 35 МВт		
Саскылах	нет	0	0,00
Хайыр	1. Строительство школы	131	0,11
	2. Строительство котельной		
Чокурдах	1. Развитие сферы оленеводства	6,621	0,61
Кюсюр	1. Рыбзавод	6,476	0,58
Оленегероск	нет	0	0,00

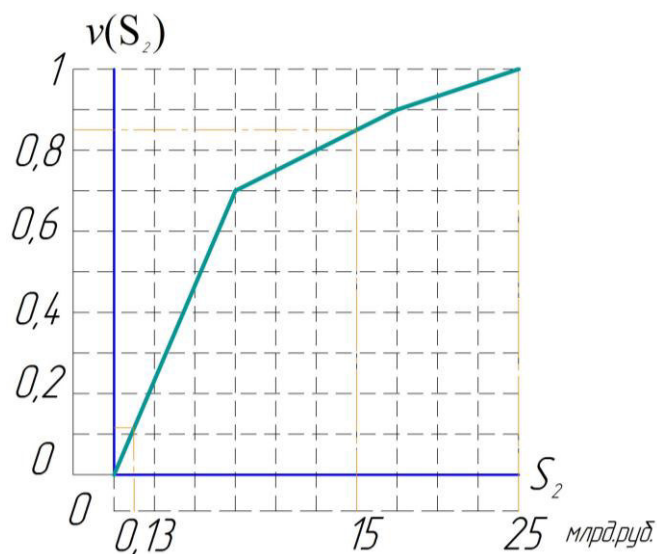


Рис. 3.24. Построение ОФЦ по субкритерию «Наличие инвестиционных проектов»

Исходя из данных таблицы 3.6, составлена линейная ОФЦ по субкритерию s_3 – численность населения. Далее были получены оценки по данному критерию в соответствии с ОФЦ, результаты представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8. Результат расчёта по социальному критерию

Динамика численности населения					Наличие инвест. проектов		Оценка по субкрит.
Численность постоянного населения, человек			2018 г. в % к 2002 г.	Оценка по ОФЦ			
Пункт	2018 г.	Оценка по ОФЦ					
Тикси	4537	1,0	77,07	0,377	25260,14	1,00	0,844
Усть-Оленек	27	0,0	51,92	0,000	0	0,00	0,000
Быков Мыс	517	0,097	142,42	1,000	0	0,00	0,299
Таймылыр	757	0,145	84,11	0,356	0	0,00	0,162
Найба	522	0,098	104,40	0,580	0	0,00	0,194
Юрунг-Хая	1147	0,223	109,23	0,633	15015	0,85	0,482
Саскылах	2317	0,455	116,73	0,716	0	0,00	0,407
Хайыр	433	0,08	98,20	0,511	131	0,35	0,256
Чокурдах	2085	0,465	80,35	0,436	6,621	0,14	0,377
Кюсюр	1345	0,262	100,67	0,539	6,476	0,13	0,298

Проведём расчёт оценок альтернатив по комплексному критерию f_3 . ОФЦ в данном случае приняли линейной и на основании таблицы 3.8. проведено сравнение и ранжирование альтернатив по комплексному критерию, отражающему социальный фактор.

Для этого был использован метод SMARTER, в котором веса субкритериев на основе опроса ЛПР были выбраны следующие – 0,25 для динамики численности населения, 0,25 для наличия инвестиционных проектов и 0,5 для численности населения. Таким образом, была составлена таблица 3.9 с результатами расчёта.

Таблица 3.9. Оценки ОФЦ по критерию f_3

Пункт	Оценки альтернатив по критерию f_3
Тикси	1,000
Усть-Оленек	0,000
Быков Мыс	0,354
Таймылыр	0,191
Найба	0,230
Юрунг-Хая	0,571
Саскылах	0,482
Хайыр	0,303
Чокурдах	0,446
Кюсюр	0,353

Далее определяются оценки по остальным критериям. Построение ОФЦ для альтернатив по критерию f_1 изображено на рис. 3.25. На основании данных экономического расчёта (таб. 3.5) получены оценки ОФЦ по критерию, представленные в таблице 3.10.

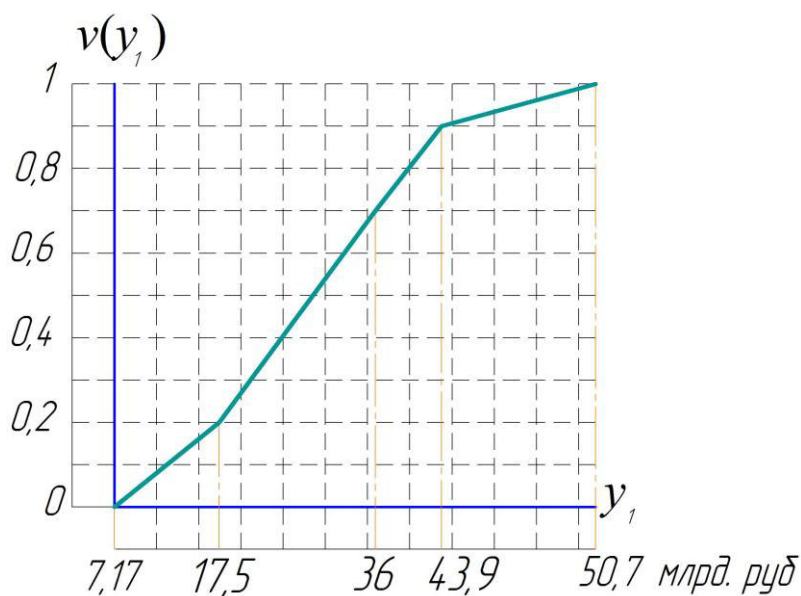


Рис. 3.25. ОФЦ для критерия f_1 – «Чистый дисконтированный доход»

Таблица 3.10. Оценки ОФЦ по критерию f_1

Пункт	Оценки альтернатив по критерию f_1
Тикси	1,000
Усть-Оленек	0,900
Быков Мыс	0,862
Таймылыр	0,700
Найба	0,651
Юрунг-Хая	0,464
Саскылах	0,200
Хайыр	0,120
Чокурдах	0,090
Кюсюр	0,000

Следующим критерием, по которому получены значения ОФЦ для альтернатив, является критерий f_2 – «Коэффициент вариации». ОФЦ для данного критерия представлена на рис. 3.26, а оценки – в таблице 3.11.

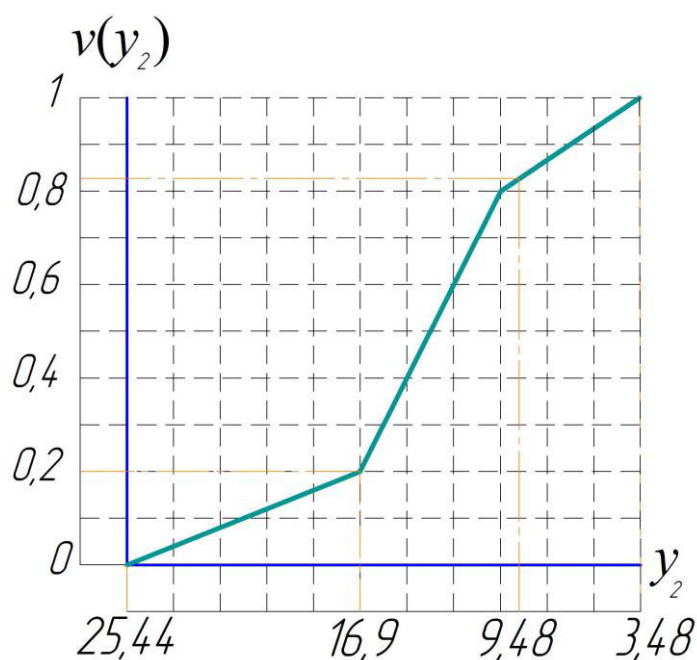


Рис. 3.26. ОФЦ для критерия f_2 – «Коэффициент вариации»

Таблица 3.11. Оценки ОФЦ по критерию f_2

Пункт	Оценки альтернатив по критерию f_2
Тикси	0,820
Усть-Оленек	0,817
Быков Мыс	0,820
Таймылыр	0,817
Найба	0,820
Юрунг-Хая	0,680
Саскылах	0,950
Хайыр	0,560
Чокурдах	0,000
Кюсюр	0,000

Последним, четвёртым критерием в анализе является f_4 – близость рекреационных природоохранных территорий. На основании географических карт были произведены измерения расстояний до трёх ближайших природоохранных территорий. Вес влияния близости территории первой зоны был выбран 0,7, второй – 0,2, третьей – 0,1. В качестве ограничения было выбрано расстояние в 100 км, функция ценности в зависимости от расстояния принята линейной. Таким образом, была составлена таблица оценки расположения природоохранной территории (таб. 3.12). ОФЦ для данного критерия представлена на рис. 3.27.

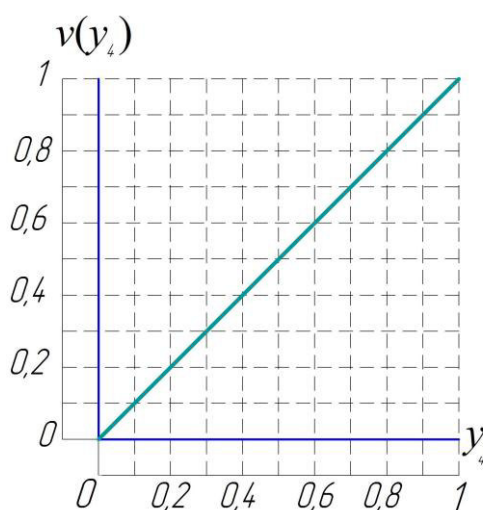
Рис. 3.27 ОФЦ для критерия f_4 – «Экологический фактор»

Таблица 3.12. Оценка близости расположения природоохранной территории к исследуемому району

Пункт	Природоохранная территория	Расстояние от пункта, км	Оценка	Сумма оценок	Оценка по ОФЦ
Тикси	РР* «Лена-Дельта»	50	0,350	0,350	0,375
Усть-Оленёк	РР «Терпей-Тумус»	59	0,287	0,303	0,29
	РР республиканского значения «Бур»	92	0,016		
Быков Мыс	РР «Лена-Дельта»	8	0,644	0,644	0,9
Таймылыр	РР республиканского значения «Бур»	45,5	0,382	0,446	0,54
	РР «Лена-Дельта»	68	0,064		
Найба	Государственный природный палеонтологический заказник «Янские Мамонты»	44	0,392	0,392	0,45
Юрунг-Хая	РР «Терпей-Тумус»	56	0,308	0,308	0,3
Саскылах	РР республиканского значения «Бур»	80	0,140	0,140	0
Хайыр	Государственный природный палеонтологический заказник «Янские Мамонты»	0	0,700	0,700	1
Чокурдах	РР республиканского значения «Суннагино – Силиглинский»	14	0,602	0,602	0,825
Кюсюр	РР «Лена-Дельта»	51	0,343	0,343	0,362

*РР – ресурсный резерват

Далее проведена проверка условий применимости метода МАUT. В качестве ЛПР были приглашены несколько специалистов: заведующие кафедрами «Электроэнергетики и электротехники», «Промышленной теплоэнергетики», ведущий преподаватель дисциплины «Системный анализ»

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет». Все проверки условий МАУТ для ЛПР были выполнены.

Следующим шагом было определение шкалирующих коэффициентов. Все критерии сравнивались с критерием «Чистый дисконтированный доход» (рис. 3.28).

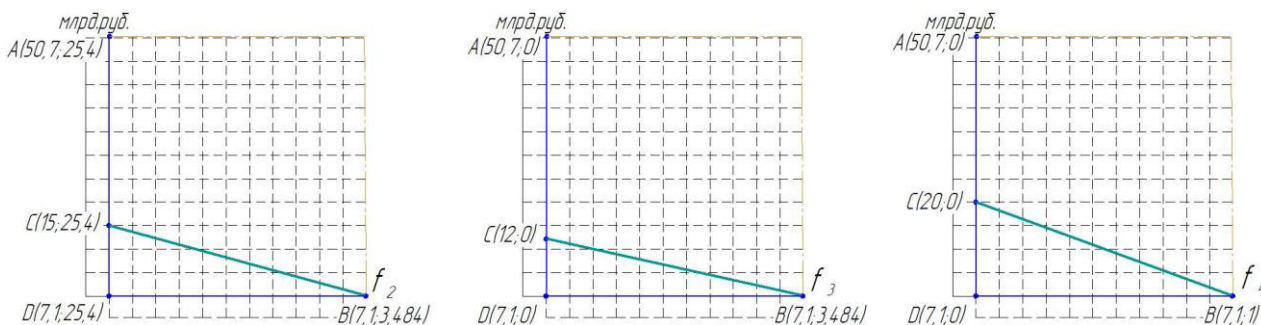


Рис. 3.28. Определение шкалирующих коэффициентов

Таким образом, на основании формул (2.4)- (2.7), была составлена система линейных уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cdot 0,15 = k_2 \\ k_1 \cdot 0,11 = k_3 \\ k_1 \cdot 0,27 = k_4 \\ k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Далее определено значение коэффициентов: $k_1=0,654$, $k_2=0,098$, $k_3=0,072$, $k_4=0,176$. Подставив в формулу (2.3) значения коэффициентов и оценок по каждому критерию для каждой альтернативы, были получены результаты многокритериальной оценки для всех альтернатив – таблица 3.13.

По таблице 3.13 можно также сравнить ранжирование районов по оценке на основании одного экономического критерия f_1 с результатами многокритериальной оценки альтернатив. Пункты в таблице представлены в порядке убывания по ЧДД, а в крайней правой колонке представлены результаты многокритериальной оценки.

Таблица 3.13. Результаты многокритериального анализа альтернатив

Пункт	Вес шкалирующего коэффициента				Многокритериальная оценка альтернатив
	0,654	0,098	0,072	0,176	
	Оценки альтернатив по критериям				
	f_1	f_2	f_3	f_4	
Тикси	1,000	0,820	1,000	0,350	0,868
Усть-Оленек	0,900	0,817	0,000	0,193	0,683
Быков Мыс	0,862	0,820	0,354	0,950	0,837
Таймылыр	0,700	0,817	0,191	0,680	0,671
Найба	0,651	0,820	0,230	0,500	0,611
Юрунг-Хая	0,464	0,680	0,571	0,200	0,446
Саскылах	0,200	0,950	0,482	0,000	0,259
Хайыр	0,120	0,560	0,303	1,000	0,332
Чокурдах	0,090	0,000	0,446	0,912	0,252
Кюсюр	0,000	0,000	0,384	0,324	0,083

Видно, что в сравнении с оценкой по одному критерию f_1 изменилось ранжирование при многокритериальной оценке альтернатив. Например, пункт Быков Мыс поднялся на второе место ввиду большой разницы в оценках по «экологическому» и «социальному» критерию в сравнении с пунктом Усть-Оленёк. Благодаря высокой оценке по экологическому критерию и средней по социальному, пункт Хайыр поднялся выше пункта Саскылах, несмотря на разницу в 0,080 (что составляет 60% от общей оценки по критерию f_1 для п. Хайыр) в оценке по ЧДД.

Таким образом, несмотря на высокую ценность экономического критерия, ранжирование районов изменяется при многокритериальной оценке. Общая адекватность результатов была проверена приглашёнными ЛПР, которые согласились с результатами анализа.

При анализе чувствительности были изменены оценки по критерию f_1 , как критерию, имеющему наибольший вес. Небольшие изменения по остальным критериям не давали существенного результата. Так понизив оценку по f_1 с 1,0 до 0,97 п. Тикси изменил позицию с первого на второе место, с многокритериальной оценкой в 0,847. Также существенно повлияло понижение оценки ЧДД на 0,03 значения для пункта Усть-Оленёк, понизив его оценку до

0,683 с 0,702. Быков Мыс, Найба, Хайыр оказались наиболее стабильными альтернативами ввиду средних и высоких оценок по остальным критериям.

Далее была проведена проверка чувствительности альтернатив к изменению весов шкалирующих коэффициентов. Для исследования влияния повышения важности экологического и социального критериев, были приняты следующие значения шкалирующих коэффициентов: $k_1=0,599$, $k_2=0,060$, $k_3=0,150$, $k_4=0,192$. Результаты расчёта значений многокритериальной оценки для альтернатив с новыми критериями представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14. Результаты многокритериального анализа альтернатив

Пункт	Оценка по критерию f_1	Шкалирующие коэффициенты							
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4
		0,654	0,098	0,072	0,176	0,599	0,060	0,150	0,192
		Многокритериальная оценка альтернатив							
Тикси	1,000	0,868				0,865			
Усть-Оленек	0,900	0,683				0,607			
Быков Мыс	0,862	0,837				0,800			
Таймылыр	0,700	0,671				0,627			
Найба	0,651	0,611				0,569			
Юрунг-Хая	0,464	0,446				0,442			
Саскылах	0,200	0,259				0,249			
Хайыр	0,120	0,332				0,342			
Чокурдах	0,090	0,252				0,295			
Кюсюр	0,000	0,083				0,115			

По результатам расчёта можно сказать, что в целом, многокритериальные оценки альтернатив понизились, а пункты Усть-Оленёк и Саскылах понизились в ранжировании на одно место. Тикси и Быков Мыс сохранили устойчивые лидирующие позиции, показывая тем самым стабильность в результатах оценки.

3.5. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭУ с учетом неопределенности предпочтений ЛПР

В параграфе 2.2. была предложена модернизация метода MAUT (рис. 2.4) для учёта неопределённости ЛПР в предпочтениях относительно оценок альтернатив. Проведём анализ выбранных альтернатив с учётом неопределённости предпочтений. Для этого построим группу ОФЦ для каждого критерия (рис. 3.29-3.31). Зададим количество оценок, на которые разделится интервал, равным 9 (точки $v_a(y_i^2)$ и $v_b(y_i^2)$). Средняя ОФЦ будет соответствовать выбранным ранее ОФЦ (рис. 3.29-3.31). Поскольку по критерию f_3 и f_4 ОФЦ были линейными, то и в данном случае их группы будут совпадать (рис. 3.31). Линии излома границ располагается вертикально – в соответствии с ходом рассуждений ЛПР – когда сначала ему задаётся значение критерия, который он пытается оценить по шкале ценности. Все построения и расчёты будем выполнять в специально созданной автором совместно с научным руководителем программе для ЭВМ «Wind-MCA» [210] в Модуле многокритериального анализа (см. параграф 3.4).

Стоит отметить, что при опросе ЛПР наблюдается снижение затрат времени на получение ответов от ЛПР, благодаря возможности задания интервала оценок при построении ОФЦ. Экспертам было намного проще задавать оценки интервалом, нежели точными значениями.

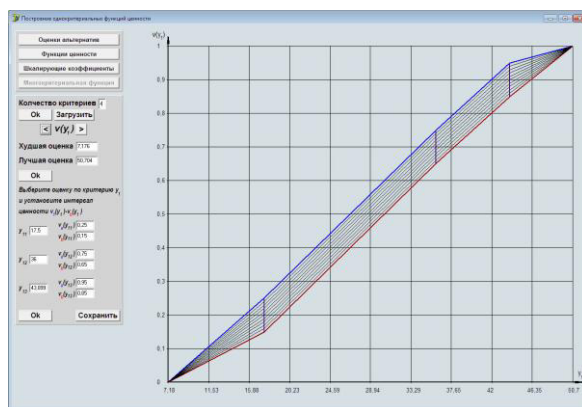


Рис. 3.29. Группа ОФЦ с учётом неопределённости ЛПР в отношении оценок по критерию f_1 (чистый дисконтированный доход)

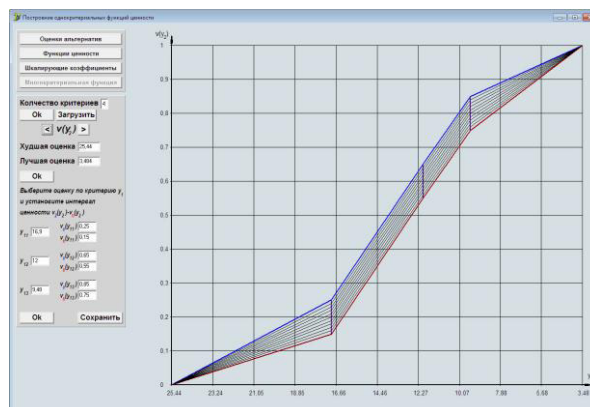


Рис. 3.30. Группа ОФЦ с учётом неопределённости ЛПР в отношении оценок по критерию f_2 (коэффициент вариации)

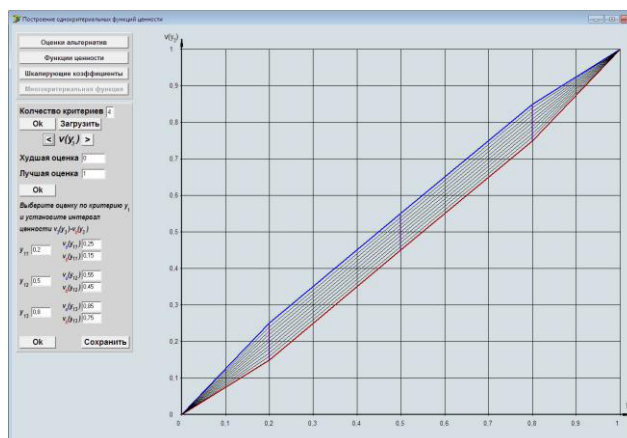


Рис. 3.31. Группа ОФЦ с учётом неопределённости ЛПР в отношении оценок по критерию f_3 (социальная эффективность) и f_4 (экологическая эффективность)

Количество шкалирующих коэффициентов теперь определяется комбинациями всех функций ОФЦ. Далее, в программе для ЭВМ «Wind-MCA» был произведён расчёт многокритериальной функции ценности (МФЦ) для каждой альтернативы с учётом неопределённости ЛПР. Результаты расчёта отражены на рис. 3.32.

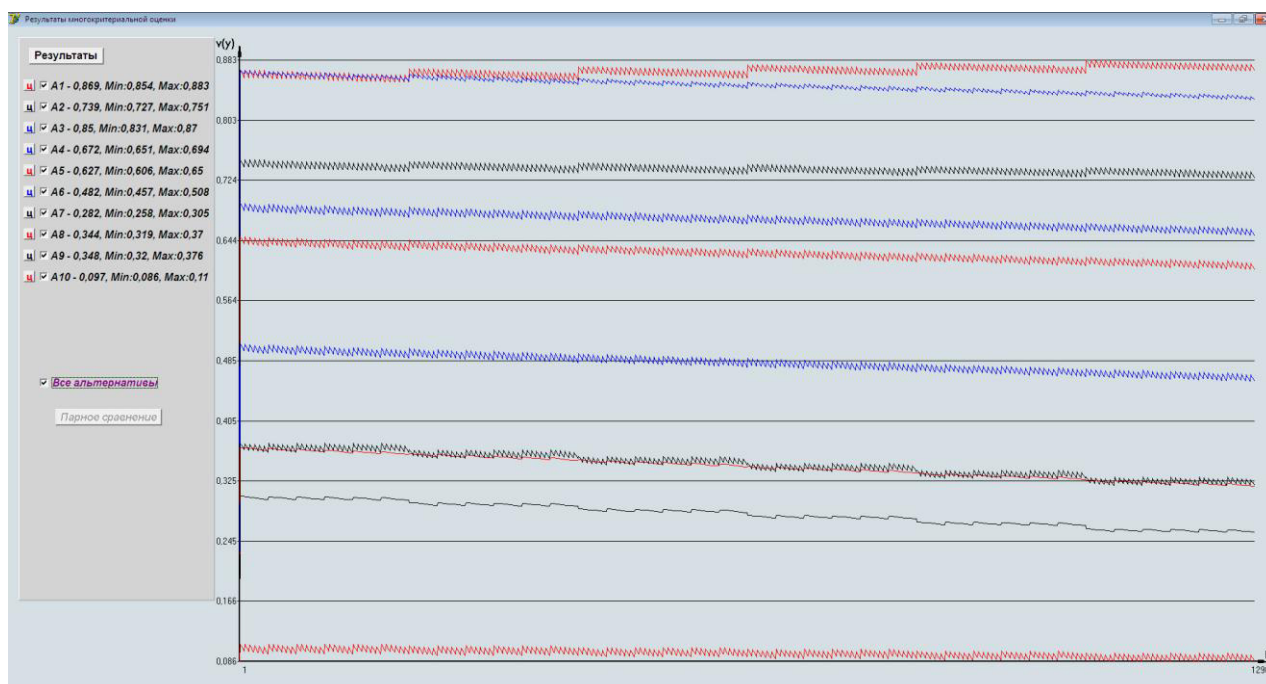


Рис. 3.32. Результаты многокритериальной оценки альтернатив в условиях неопределенности предпочтений ЛПР относительно оценок по критериям

По результатам видно, что альтернатива №1 (п. Тикси, 86,82%) и №3 (п. Быков Мыс, 86,15%) имеют не только близкие результаты, но и пересекающиеся функции. Это означает, что при определённых предпочтениях ЛПР в критериях п. Быков Мыс будет являться более предпочтительной альтернативой. Также видно, что альтернативы: №7 (п. Саскылах, 27,45%), №8 (п. Хайыр, 36,05%), №6 (п. Юрунг-Хая, 50,92%) являются достаточно неустойчивыми и наиболее из всех альтернатив подвержены изменениям в худшую сторону оценок. Самой стабильной оказалась альтернатива №2 (п. Усть-Оленёк, 73,9%), однако, она же сильно понизила свою позицию при многокритериальной оценке, со второго места по оценке чистого дисконтированного дохода к 20-ти годам работы ВЭУ (таб. 3.6) до третьего места, с достаточно большой разницей в 12,25% от п. Быков Мыс, который находится на втором месте по МФЦ.

В таблице 3.15 приведено сравнение результатов расчёта по одному критерию f_1 – экономической эффективности проекта, результатов расчёта по

многокритериальной оценке и результатов расчёта по многокритериальной оценке с учётом неопределённости ЛПР.

Таблица 3.15. Результаты многокритериального анализа альтернатив с учётом неопределённости ЛПР в отношении оценок критериев

Пункт	Оценка по критерию f_1	$v(y)$ без учёта неопределённости ЛПР	$v(y)_{\text{сред}}$ с учётом неопределённости ЛПР	$v(y)_{\min}$	$v(y)_{\max}$	$K_{\text{уст}}$
Тикси	1,000	0,868	0,865	0,852	0,883	30,45
Усть-Оленек	0,900	0,683	0,739	0,727	0,751	31,29
Быков Мыс	0,862	0,837	0,862	0,831	0,870	22,31
Таймылыр	0,700	0,671	0,672	0,651	0,694	16,14
Найба	0,651	0,611	0,632	0,606	0,650	14,77
Юрунг-Хая	0,464	0,446	0,509	0,457	0,508	9,96
Саскылах	0,200	0,259	0,274	0,258	0,305	6,49
Хайыр	0,120	0,332	0,360	0,370	0,390	19,50
Чокурдах	0,090	0,252	0,341	0,320	0,376	6,71
Кюсюр	0,000	0,083	0,100	0,086	0,110	4,58

В таблице видно, что с учётом неопределённости ЛПР изменился порядок ранжирования в сравнении с оценкой по одному критерию f_1 - ЧДД. Наилучшей альтернативной по-прежнему является п. Тикси, но в данном случае мы можем оценить устойчивость альтернатив к неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок. Альтернативы Тикси, Усть-Оленёк, Быков мыс, Найба, Таймылыр, Хайыр обладают устойчивыми результатами и оценку по ним достаточно провести на основании среднего значения многокритериальной функции ценности. В то время как по остальным пунктам недостаточно было одной многокритериальной оценки – здесь нужен более детальный анализ, поскольку альтернативы имеют низкий $K_{\text{уст}}$.

3.6. Анализ влияния рельефа местности при оценке эффективности применения ВЭС в районе и выборе площадок

Для апробации методики (рис. 2.8, 2.9) был выбран посёлок Аян, Хабаровского края, расположенный на $56^{\circ}28' \text{с.ш.}$ и $138^{\circ}9' \text{в.д.}$ на берегу Аянского залива Охотского моря. Население села составляет порядка 854 человек по данным за 2014 год. Электроснабжение осуществляется дизельной электростанцией, поэтому экономическую эффективность применения ВЭУ можно обосновать экономией ГСМ при работе ДЭС.

По данным архивов метеостанции у п. Аян среднегодовые скорости ветра составляют 2,5 – 3,5 м/с. Это низкие скорости ветра для рассмотрения района в качестве места для установки ВЭУ. Но рельеф в районе посёлка достаточно разнообразен и, если принять во внимание его влияние на скорость ветрового потока в локальных местах, то возможно, будут найдены площадки с повышенными средними скоростями ветра.

На основании данных архива метеостанции у п. Аян, составлен массив прогнозных данных о скорости и направлении ветра в течение каждого часа и проведён расчёт экономического эффекта работы ВЭС аналогичный расчёту, в параграфе 3.2. Результаты расчёта представлены в таблице 3.16. Как видно из результатов расчёта, из-за низкой скорости ветра по данным метеостанции, применение ВЭУ в электроснабжении посёлка абсолютно неэффективно с точки зрения экономического эффекта.

Таблица 3.16. Расчёт экономической эффективности работы ВЭС в п. Аян

Год	Средняя скорость ветра, м/с	Выработка, тыс. кВтч	Экономия ГСМ, млн. руб	ЧДД, млн. руб
2015	2,64	55,771	0,43	-16,866
2016	2,57	56,792	0,50	-17,218
2017	2,34	41,713	0,42	-17,676
2018	2,52	56,62	0,65	-17,977
2019	2,87	71,293	0,94	-18,105
2020	3,03	131,172	1,98	-17,577
2021	2,66	51,329	0,88	-17,842
2022	2,84	68,831	1,35	-17,876
2023	2,93	78,199	1,75	-17,752
2024	2,85	68,942	1,76	-17,694
2025	2,64	55,771	1,62	-17,764
2026	2,57	56,792	1,88	-17,779
2027	2,34	41,713	1,58	-17,975
2028	2,52	56,62	2,44	-17,900
2029	2,87	71,293	3,51	-17,528
2030	3,03	131,172	7,36	-16,031
2031	2,66	51,329	3,28	-15,896
2032	2,84	68,831	5,02	-15,363
2033	2,93	78,199	6,50	-14,559
2031	2,85	68,942	6,53	-13,868

В соответствии с методикой определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала (рис. 2.8, 2.9), на следующем этапе создана трёхмерная модель рельефа местности и выполнено гидродинамическое моделирование ветрового потока по восьми направлениям, соответствующих розе ветров. Модель рельефа района посёлка Аян была построена в масштабе 1:1 (площадь выбранного участка 10x10 км). Рельеф района посёлка создавался в бесплатной временной версии программы Rhinoceros 5.0 с установкой плагина Lands Design, который позволяет импортировать рельеф местности, используя адаптированные данные STRM через приложение Google Earth. Далее, модель помещалась в замкнутую область, высотой в два раза больше наивысшей точки рассматриваемого рельефа и импортировалась в программный комплекс Flow Vision 3.0 для проведения аэродинамических

расчётов. Данный программный комплекс был на время бесплатно предоставлен компанией ООО «ТЕСИС» по программе «Учись, студент!».

Перед расчётом была задана расчётная сетка, объём ячеек, непосредственно прилегающих к поверхности рельефа – 9 м^3 (рис. прил. 1.1). С высотой объём ячеек увеличивался для уменьшения расчётного времени.

Начальным условием расчёта является генерация воздушного потока (скоростью $3,3 \text{ м/с}$) по восьми сторонам: север, юг, восток, запад, северо-восток, юго-восток, северо-запад, юго-запад. Повышение скорости ветра с высотой учитывается степенным законом (2.9).

При моделировании явно выделялось расположение областей локального повышения и понижения средней скорости ветрового потока в зависимости от рельефа местности и направления начального потока (рис. 3.33-3.34).

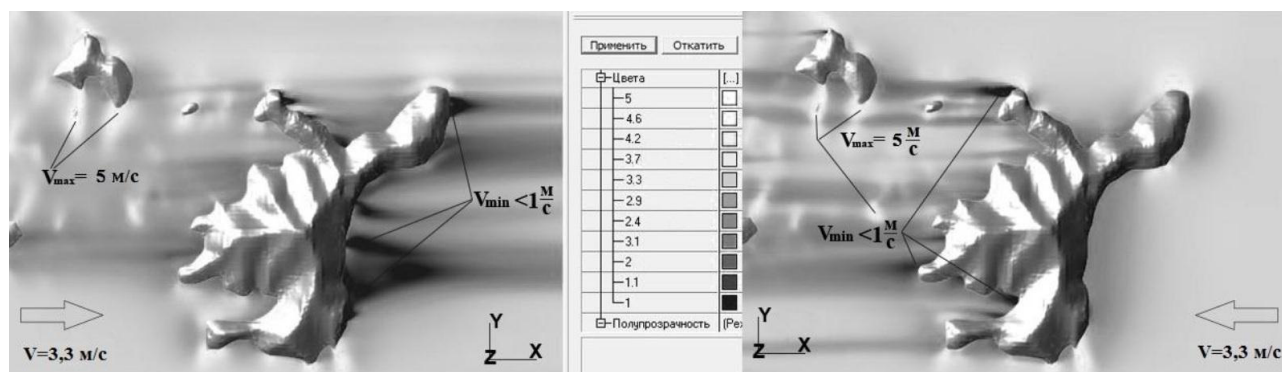


Рис. 3.33. Скриншот окна Постпроцессора FlowVision 3.0 при моделировании обтекания воздушным потоком рельефа в районе п. Аян с запада (слева) и с востока (справа). Начальная скорость ветра $3,3 \text{ м/с}$, изображение показано на высоте 150 м от уровня моря

Например, на рис. 3.34 показан выбор наиболее эффективных площадок при западном ветре. Аналогично выполнили моделирование ветрового потока для всех выбранных направлений и определили наиболее перспективные зоны для каждого направления (рис. 3.35) по методике, представленной в параграфе 2.3 (рис. 2.9).

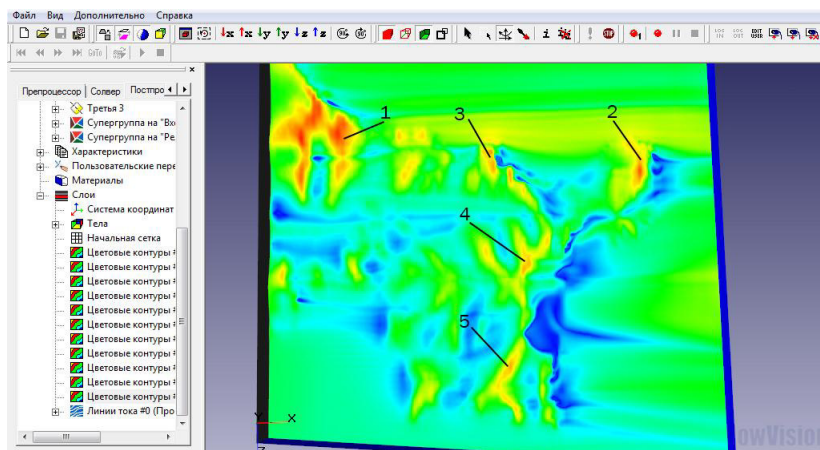


Рис. 3.34. Скриншот окна постпроцессора FlowVision 3.0. Определение наиболее эффективных областей на расстоянии 30 м от поверхности земли при западном ветре

Таким образом, были намечены для дальнейшего сравнения четыре площадки – три перспективные площадки (№1, №2, №3) с повышением фоновой скорости ветра до 2,1 в максимальном случае и для сравнения одна (№4) с близкой к средней скорости ветра (рис. 3.35), но расположенной близко к посёлку.

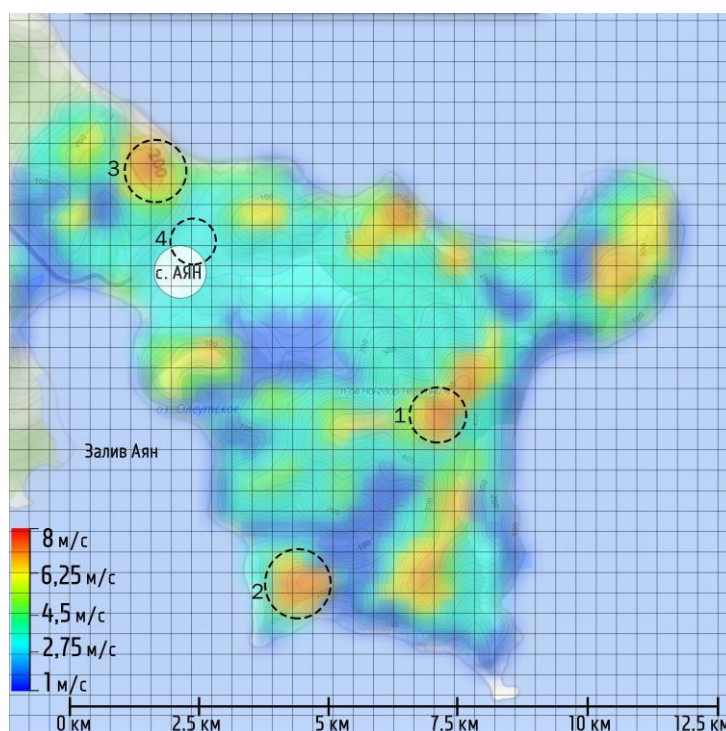


Рис. 3.35. Выбор площадок в районе п. Аян с учётом влияния рельефа местности и розы ветров

Проведён анализ площадок согласно менее детализированному способу расчёта, представленному в методике на рис. 2.9. На каждой из площадок в результате моделирования происходит изменение скорости ветра по сравнению с изначально заданной, коэффициенты усиления K_i^d представлены в таблице 4.15. Также в таблице представлены значения повторяемости скоростей ветра P_i^d , рассчитанных на основе метеоданных. На основе этих двух параметров, по формуле (2.22) рассчитан коэффициент суммарной эффективности площадки с учётом рельефа местности и розы ветров $R_{i\Sigma}$

Таблица 3.17. Коэффициенты изменения скорости ветра по восьми направлениям для выбранных площадок

№ площадки	Значение параметра								$R_{i\Sigma}$
	K_i^c	K_i^{c-B}	K_i^B	$K_i^{Ю-B}$	$K_i^{Ю}$	$K_i^{Ю-3}$	K_i^3	K_i^{c-3}	
№ 1	1,94	1,80	1,51	1,64	1,74	1,66	1,58	1,50	2,812
№ 2	2,16	1,71	1,69	1,57	1,63	1,50	1,37	1,21	2,712
№ 3	1,62	1,54	1,42	0,9	1,21	1,24	1,20	1,30	2,193
№ 4	1,20	0,84	0,78	0,49	0,80	0,92	1,10	0,60	1,422
P_i^d	0,0742	0,424	0,077	0,0092	0,0506	0,229	0,1	0,036	---

Как видно из таблицы, достаточно перспективной является площадка №1 – причём она расположена выше остальных, однако имеет меньшую площадь и большую труднодоступность транспортных путей и монтажа ВЭУ. Площадка №2 расположена наиболее удалённо, но также имеет высокий коэффициент повышения и площадь, большую, чем у площадки №1. Площадка №3 расположена достаточно близко к посёлку, имеет хороший коэффициент повышения скорости ветра при северных и северо-восточных ветрах, но затенена с юго-востока. Площадка №3 имеет сравнительно среднюю площадь, небольшую высоту, недалеко расположены транспортные пути. Площадка №4 расположена в непосредственной близости к посёлку, наблюдается увеличение

скорости при северном ветре, возможно связанное с естественным уплотнением воздушного потока между двумя холмами, расположенными ближе к берегу, а в остальных направлениях, кроме западного, ветроэнергетический потенциал только понижается.

Теперь проведём более точный технико-экономический расчёт ЧДД всех выбранных площадок, результаты его представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18. Результаты технико-экономического расчёта площадок.

Год	Площадка №1		Площадка № 2		Площадка № 3		Площадка № 4	
	ЧДД	V_{cp}	ЧДД	V_{cp}	ЧДД	V_{cp}	ЧДД	V_{cp}
	млн. руб.	м/с	млн. руб.	м/с	млн. руб.	м/с	млн. руб.	м/с
2015	-15,187	4,57	-15,683	4,34	-15,925	3,75	-17,015	2,3
2016	-13,829	4,47	-14,838	4,26	-15,345	3,64	-17,523	2,3
2017	-12,695	4,05	-14,156	3,87	-14,957	3,3	-18,098	2,1
2018	-11,337	4,39	-13,288	4,2	-14,324	3,6	-18,569	2,2
2019	-9,731	5,01	-12,224	4,78	-13,474	4,13	-18,910	2,5
2020	-7,699	5,21	-10,802	5,03	-12,408	4,31	-19,278	2,7
2021	-6,065	4,54	-9,714	4,38	-11,602	3,76	-19,750	2,3
2022	-3,689	4,84	-8,003	4,69	-10,243	4,05	-20,079	2,5
2023	-1,074	4,96	-6,106	4,83	-8,622	4,19	-20,284	2,5
2024	1,821	4,99	-3,910	4,87	-6,904	4,15	-20,453	2,6
2025	4,632	4,57	-1,950	4,34	-5,363	3,75	-20,782	2,3
2026	7,554	4,47	0,090	4,26	-3,775	3,64	-21,064	2,3
2027	10,093	4,05	1,853	3,87	-2,515	3,3	-21,459	2,1
2028	13,015	4,39	3,934	4,2	-0,847	3,6	-21,677	2,2
2029	16,363	5,01	6,352	4,78	1,202	4,13	-21,673	2,5
2030	20,445	5,21	9,385	5,03	3,634	4,31	-21,712	2,7
2031	23,842	4,54	11,843	4,38	5,606	3,76	-21,933	2,3
2032	28,513	4,84	15,372	4,69	8,535	4,05	-21,906	2,5
2033	33,594	4,96	19,222	4,83	11,903	4,19	-21,667	2,5
2034	39,157	4,99	23,584	4,87	15,445	4,15	-21,367	2,6

Как видно из таблицы, экономическая эффективность применения ВЭУ возросла после учёта изменения ветра. Тёмно-серым цветом отмечены ячейки в тот год, когда ВЭУ окупала вложения. Так, на первой площадке срок

окупаемости ВЭУ NP-100 составил 10 лет, на второй площадке – 12 лет, на третьей – 15 лет. Естественно, что на четвёртой площадке, где условия хуже, чем на простой открытой местности срок окупаемости составил более 17 лет. Таким образом, показано, что очень важно проводить дополнительные расчёты и гидродинамическое моделирование для поиска наиболее перспективных площадок. Рассмотрим многокритериальный выбор площадок в следующем параграфе.

3.7. Многокритериальный выбор площадок для размещения ВЭС

Многокритериальный выбор площадок для размещения ВЭС проведём с использованием предложенной автором методики на основании метода MAUT (рис. 2.1). Иерархия целей и критериев представлена на рис. 3. 36.



Рис. 3. 36. Иерархия целей и критериев задачи выбора площадки для размещения ВЭС

Одним из основных критериев по-прежнему является критерий, отражающий экономическую эффективность площадки – чистый дисконтированный доход.

Следующей целью является максимизация удобства обслуживания и монтажа ВЭС. Данный критерий автор предлагает оценивать эксперту по

введённой пятибалльной искусственной шкале оценок, представленной в таблице 3.19.

Таблица 3.19. Шкала оценки удобства обслуживания и монтажа ВЭС

Балл	Описание площадки
0	Дальнее расположение от центра электрических нагрузок; нет транспортных подходов; много кустарников, деревьев; горная каменистая местность; необходимость усиления фундамента
0,25	Среднее расположение от центра электрических нагрузок; транспортные пути в небольшом удалении; много кустарников, деревьев; горная каменистая местность; необходимость усиления фундамента
0,50	Среднее расположение к центру электрических нагрузок; транспортные пути в небольшом удалении; деревья и кустарники в среднем количестве; площадка с небольшими перепадами высот; достаточно хороший для строительства грунт.
0,75	Близкое расположение к центру электрических нагрузок; транспортные пути близко; деревья и кустарники в малом количестве; площадка с малым уклоном; надёжный для строительства грунт.
1	Близкое расположение к центру электрических нагрузок; поблизости удобные транспортные пути; практически нет деревьев и кустарников; ровная горизонтальная площадка; надёжный для строительства грунт.

Третьей целью является минимизация воздействия на окружающую среду. Этот критерий выражается в ценности земель и его предлагается оценивать эксперту по введённой пятибалльной шкале оценке, представленной в таблице 3.20.

Таблица 3.20. Шкала оценки ценности земель

Балл	Описание площадки
0	Ценные чернозёмные почвы, район обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения, ценные лесные породы и кустарники
0,25	Площадка с ценными лесными породами и кустарниками, вокруг района площадки обитают редкие представители флоры и фауны
0,50	Плодородные почвы, районы обитания редких или уникальных биологических видов далеко, мало деревьев и кустарников
0,75	Земли не представляют сельскохозяйственной ценности, районы обитания редких или уникальных биологических видов далеко, присутствуют деревья и кустарники
1	Земли не представляют сельскохозяйственной ценности, районы обитания редких или уникальных биологических видов далеко, отсутствуют деревья и кустарники

Далее произведён расчёт оценки критериев. По критерию f_1 – выполнено построение ОФЦ (рис. 3.37) с учётом уточненной скорости ветра (данные из таб. 3.18).

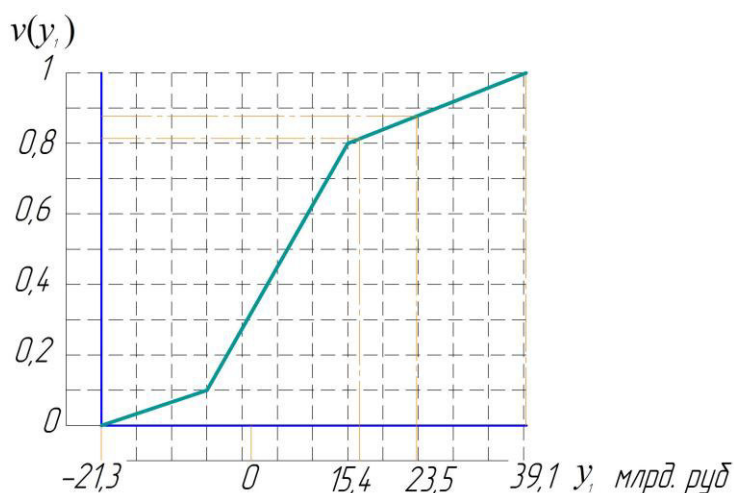


Рис. 3.37. ОФЦ для критерия f_1 - чистого дисконтированного дохода

Для оценки по критериям f_2 и f_3 были приглашены в качестве экспертов преподаватели кафедры Электроэнергетики и электротехники ФГБОУ ВО «Братского государственного университета». Таким образом, был составлен массив всех оценок по четырём площадкам. Далее, используя метод МАУТ, экспертами произведён выбор соотношений между критериями. Таким образом были определены шкалирующие коэффициенты: $k_1=0,592$, $k_2=0,281$ $k_3=0,127$. Результаты многокритериальной оценки площадок представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.21. Многокритериальная оценка площадок

Критерий	k_i	Оценки по критериям			
		Площадка №1	Площадка №2	Площадка № 3	Площадка №4
f_1	0,592	1	0,877	0,813	0
f_2	0,281	0	0,25	0,75	1
f_3	0,127	0,75	1	0,75	0,5
Многокритериальная оценка	---	0,687	0,716	0,787	0,344

По полученным многокритериальным оценкам площадка №3 является наиболее перспективной. Она имеет меньший ЧДД, однако расположена близко к потребителю и её земли не обладают большой природной ценностью.

Таким образом, проведен многокритериальный выбор площадки для размещения ВЭС с учётом розы ветров и рельефа местности. Выбранная площадка имеет повышенные скорости ветра, что позволяет говорить об экономической целесообразности рассмотрения её в качестве варианта для размещения ВЭС.

3.8. Выводы по главе 3

В третьей главе произведено описание структуры СППР «Wind-MCA», модулей, разработанных автором. Проводится апробация предложенных автором трёх методик и программы для ЭВМ «Wind-MCA».

1. С помощью программы для ЭВМ «Wind-MCA» произведена оценка экономической эффективности районов размещения ВЭС и выполнено ранжирование исследуемых пунктов.

При оценке использовались статистически необработанные архивы данных наблюдений на метеостанциях, проводимые несколько раз в сутки, паспортные мощностные характеристики ВЭУ, суточные графики электрических нагрузок для четырёх сезонов. Это позволило повысить точность и обоснованность экономического расчёта.

2. Проведено исследование решений, получаемых с помощью методики многокритериального выбора районов для размещения ВЭС. В анализ был включён дополнительный критерий, отражающий экономическую устойчивость проекта, а также неэкономические критерии: экологический и социальный. Ранжирование по многокритериальной оценке отличается от ранжирования по одному экономическому критерию. Применение методики позволяет более обоснованно подойти к анализу районов, поскольку в полученных

многокритериальных оценках содержатся факторы, которые ранее не учитывались или учитывались неформализованно.

3. С помощью методики принятия решений на основе метода МАУТ с учётом неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок произведено уточнение полученного ранжирования районов и определение наиболее устойчивых альтернатив.

Анализ с помощью данной методики позволил выявить устойчивые к изменениям предпочтений ЛПР альтернативы, которые следует рассматривать как наиболее перспективные для дальнейших исследований.

Применение методики позволяет сократить временные затраты ЛПР на формирование ответов. Также благодаря методике снижается вероятность ошибочных ответов ЛПР, поскольку интервальные оценки ценности позволяют включить в анализ все варианты предпочтений ЛПР.

4. На основании методики многокритериального выбора площадок для размещения ВЭС произведено гидродинамическое моделирование ветрового потока в трёхмерной модели рельефа исследуемого района и выбрана эффективная площадка для размещения ВЭС.

Применение данной методики позволило:

- существенно повысить точность технико-экономического анализа за счёт применения аэродинамического моделирования;
- выявить наиболее перспективные площадки, а также локальные зоны затиший, где не следует устанавливать ВЭС;
- показать возможность экономически целесообразного применения ВЭУ в определённых зонах, несмотря на низкие среднегодовые скорости ветра по данным наблюдений на метеостанции.

5. Многокритериальный подход к выбору площадки размещения ВЭС позволяет учесть помимо экономической оценки также неэкономические аспекты: экологические, технические, социальные. В этой связи, полученные с применением предложенной методики решения, являются более обоснованными, отвечают большему числу целей и требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных диссертационных исследований решена актуальная научно-практическая задача развития методического и программного обеспечения для оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе методов многокритериального анализа и аэродинамического моделирования. При этом получены следующие научные результаты:

1. Усовершенствована схема проведения исследований применения ВЭУ, отличающаяся формализованным подходом к учёту неэкономических факторов, использованием статистически необработанных метеоданных, данных геоинформационных систем для аэродинамического моделирования, данных о ВЭУ и потребителе.

2. Разработана методика поддержки принятия решений по выбору районов и площадок размещения ВЭС на основе методов многокритериального анализа MAUT и SMART .

Применение методики позволяет более обоснованно подойти к анализу районов, поскольку в полученных многокритериальных оценках содержатся факторы, которые ранее не учитывались или учитывались неформализованно. Использование метода SMART позволяет снизить загрузку ЛПР при анализе субкритериев.

3. Усовершенствована методика многокритериального выбора альтернатив для условий неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок.

Анализ с помощью данной методики позволяет выявить устойчивые к изменениям предпочтений ЛПР альтернативы, которые следует рассматривать как наиболее перспективные для дальнейших исследований, а также оценить влияние отклонений оценок ЛПР и оценок альтернативы по критерию на результаты анализа.

4. Разработана методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала с применением трёхмерного моделирования и аэродинамических расчётов.

Определение перспективных площадок с учётом влияния рельефа местности и розы ветров имеет два уровня анализа различной детализации. Анализ на основе статистически обработанных данных о скорости и направлении ветра позволяет проводить предварительные исследования для выявления перспективных районов размещения ВЭС. Более детальный анализ на основе статистически необработанных данных о скорости и направлении ветра используется для экономической оценки проектов.

5. Разработаны модули анализа ветроэнергетического потенциала и многокритериального анализа альтернатив в СППР «Wind-MCA» для задач ввода ветроэнергетических мощностей.

6. Проведен многокритериальный анализ и ранжирование районов размещения ВЭС в северных улусах республики Саха (Якутия) с использованием разработанного методического и программного обеспечения.

Особенности анализа:

- учёт неэкономических факторов с выбором экологического, социального критериев и критерия стабильности работы ВЭУ.

- учёт неопределённости ЛПР в отношении критериальных оценок.

Результаты данного анализа имеют отличия в сравнении с анализом по одному критерию – экономической эффективности работы ВЭУ.

7. Проведено аэродинамическое моделирование обтекания воздушным потоком рельефа местности в районе посёлка Аян, Хабаровского края. Выполнен многокритериальный анализ и выбор площадки для размещения ВЭС с использованием разработанного методического и программного обеспечения.

Особенности анализа:

- построение цифровой трёхмерной модели исследуемой местности и проведения аэродинамических расчётов обтекания ветровым потоком рельефа.

- проведен многокритериальный анализ площадок размещения ВЭС. Помимо критерия экономической эффективности были учтены экологические воздействия ВЭС, а также удобство обслуживания и монтажа. Это позволило повысить обоснованность сравнительной оценки.

Применение аэродинамического моделирования позволило:

- существенно повысить точность технико-экономического анализа;
- выявить наиболее перспективные площадки, а также локальные зоны затиший, где не следует устанавливать ВЭС;
- показать возможность экономически целесообразного применения ВЭУ в определённых зонах, несмотря на низкие среднегодовые скорости ветра по данным наблюдений на метеостанции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев В. В. и др. Перспективы развития альтернативной энергетики и её воздействие на окружающую среду. – М. – Кацивели: Изд-во МГУ, НАН Украины, Морской гидрофизич. ин-т, 1999. – 152 с.
2. Андреева Е. В. Исследование эффективности новой схемы ветродизельного комплекса. Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. № 1, 2007 г., с.: 105
3. Андрианов В. Н. Сельские ВЭС и технико-экономические основы их применения: Автореф. дис. канд.тех.наук. –М., 1953
4. Арзамасцев Д.А. Модели оптимизации развития энергосистем / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высшая школа, 1987. – 272 с.
5. Артемьев А. Ю. Анализ эффективности использования ветроэнергетических установок в республике Саха (Якутия) по данным метеостанций. Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 3 т. Т.1 /Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во томского политехнического университета, 2011. – 581 с.
6. Артемьев А. Ю. Информационные технологии в решении задачи оценки ветроэнергетического потенциала района. Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи. Материалы III российской молодежной научной школы-конференции. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2015
7. Артемьев А. Ю. Информационные технологии в решении задачи оценки ветроэнергетического потенциала района. Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» – Севастополь, 2015. – Том 1, 433 с. 234
8. Артемьев А. Ю. Комплексный анализ эффективности эксплуатации ветровых и солнечных установок. Естественные и инженерные науки –

развитию регионов Сибири: материалы XII (XXXIV) Все-российской научно-технической конференции. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 191 с.

9. Артемьев А. Ю. Методика анализа эффективности эксплуатации ветроэнергетических установок по данным метеостанций. ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ // Специальный выпуск №1. Материалы Молодёжной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электро-технической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия-2013». - Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский гос-ударственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2013. – 452 с.;

10. Артемьев А. Ю., Шакиров В. А. Анализ ветроэнергетических ресурсов в республике Саха (Якутия) методом непосредственного расчёта. Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы II Международной научно-практической конференции / Под. Ред. А. В. Павлова. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2011. – 324 с.;

11. Артемьев А.Ю., Методика принятия решений при выборе района для размещения ВЭС с учётом неопределённости в отношении критериальных оценок // Системные исследования в энергетике / Труды молодых учёных Вып. 46. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – 202 с. С. 98 – 105.

12. Артемьев А.Ю., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н. Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 116-122.

13. Артюгина И.М., Вастл Я., Воронкин А.Ф., Габржинский И. и др. Экономико-математические методы и модели принятия решений в энергетике / Лисочкина Т.В., Косматов Э.М., Ирешова А. и др.; Под ред. П.П. Долгова, И. Климы. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1991. – 224 с.

14. Атлас ветрового и солнечного климата России.-СПб.: Издательство им.А.И.Воейкова, 1997.-173с;

15. Бежан А. В. Перспективы развития мировой ветроэнергетики: прогноз до 2030 г. Промышленная энергетика. №11, 2007 г., с.: 40-44;

16. Безруких П.П. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива: Показатели по территориям [Текст] / П.П. Безруких, В.В. Елистратов, Г.И. Сидоренко [и др.].— М., 2007.— 272 с.
17. Беккер Н. А. Оценка экономической эффективности использования ВИЭ: дисс. канд. эк. наук; РГУНиГ им. Губкина. – М., 2007
18. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений / Сб. переводов под ред. И.Ф. Шахнова; предисл. Г.С.Поспелова. – М.: Мир, 1976. С. 172-215
19. Белов И.В., Беспалов М.С., Ключкова Л.В. и др. Сравнение моделей распространения загрязнений в атмосфере//Математическое моделирование. 1999. Т. 11. № 8.
20. Беляев Н. Н., Машихина П. Б. К расчету химического загрязнения атмосферы с учетом сложного рельефа местности. Наука та прогрес транспорту. № 34, 2010 г., с.: 165-169
21. Бобров А. В. Электроснабжение северных населённых пунктов на основе ветродизельных комплексов: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук/ А. В. Бобров. - Красноярск, 2010. – 21 с.
22. Борисов А.И., Алексеев А.В. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. — М.: Радио и связь, 1989. – 124 с.
23. Бутузов В.А., Шетов В.Х. Перспективы ветроэнергетики Краснодарского края. Сантехника, отопление, кондиционирование, № 7 (115), 2011 г., с.: 92 – 93
24. В.Г.Лабейш. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 79 с.
25. Васильев С.Н., Алескеров Ф.Т., Иванов А.А., Якуба В.И. Механизмы принятия экономических решений для утилизации нефтяного попутного газа // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 18-25

26. Васильев Ю. С., Хрисанов Н. И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. – 343 с. 22
27. Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев; [отв. ред. А. Б. Петровский]; Ин-т системного анализа РАН. – М.: Наука, 2006. – 181 с.
28. Винокуров В. И. Анализ сложившегося состояния производственно-технологического потенциала предприятий промышленности России. Управление экономическими системами: электронный научный журнал. № 5 (53), 2013 г., с.: 39
29. Виссарионов В. И., Золотов Л. И. Экологические аспекты возобновляемых источников энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 155с.
30. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
31. Волькенау И.М., Зейлигер А.Н., Хабачев Л.Д. Экономика формирования электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1981. – 320 с. 109
32. Германович В., Турилин А. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнце, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и Техника, 2011г. – 320 с.
33. Голубчиков С.Н., Зубиева В.А., Гребенщиков С.Э. Перспективы развития ветроэнергетики для севера России. Энергия: экономика, техника, экология. №1, 2014 г., с.: 48-56
34. ГОСТ Р 51237-98 - Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения;
35. ГОСТ Р 51991-2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования
36. ГОСТ Р 54418.21-2011. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 21. Измерение и оценка характеристик, связанных с качеством электрической энергии, ветроэнергетических установок, подключенных к электрической сети

37. ГОСТ Р 54418.2-2014 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 2. Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам
38. ГОСТ Р 54435-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Возобновляемая энергетика. Сооружения ветроэлектростанций. Требования безопасности. Основные положения
39. Грибков С. В. Ветродизельные энергетические комплексы для районов удаленных от централизованных линий электропередачи. Энергетическая политика. № 3, 2008 г., с.: 37-39
40. Гриневич Г.А. Опыт разработки элементов малого ветроэнергетического кадастра Средней Азии и Казахстана. – Ташкент: Изд. АН УзССР, 1952. – 151 с.
41. Давидко Д.Н., Иванов П.Е., Попов В.М. К вопросу о моделировании обтекания поверхности земли со сложным рельефом местности. -М., НММ по аэродинамике летательных аппаратов, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998
42. Диагностика ошибок построения расчётной сетки во FlowVision. ООО «Тесис» - Москва – 27.01.2014, 12 с.
43. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Маков И.Л. Интеллектуальные системы управления автономными энергетическими комплексами в составе локальных распределительных сетей малой энергетики. Известия Российской академии наук. Энергетика. № 1, 2012 г., с: 38-48
44. Дмитриев Г.С., Минин В.А. Перспективы ветроэнергетики на кольском полуострове. Энергия: экономика, техника, экология. №10, 2008 г., с.: 35-41
45. Дмитриева Ю. Ю., Позмогаева С. Б. Перспективы использования ветроэнергетики в Ульяновской области. Вестник Ульяновского государственного технического университета, № 2(58), 2012 г., с.: 37 – 41
46. Егорычев О. О., Гувернюк С. В., Исаев С. А., Поддаева О. И., Корнев Н. В., Усачов А. Е. Численное и физическое моделирование ветрового

воздействия на группу высотных зданий//Вестник МГСУ. 2011. № 3. Т. 1. С. 185-191

47. Елистратов В. В., Конеченков А. Е., Шмидт Г. Б. Развитие ветроэнергетики Украины и ее состояние в России. Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 178, 2013 г., с: 101 – 109

48. Елистратов В. В., Конеченков А. Е., Шмидт Г. Б. Развитие ветроэнергетики Украины и ее состояние в России. Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 178, 2013 г., с: 101 – 109

49. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика / В.В. Елистратов. – 3е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 424 с.

50. Елистратов В.В. Климатические факторы возобновляемых источников энергии [Текст] / В.В. Елистратов, М.М. Борисенко, Г.И. Сидоренко [и др.].—СПб.: Наука, 2010.— 235 с.

51. Елистратов В.В., Конищев М.А. Ветро дизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России//Альтернативная энергетика и экология -ISJAEE. 2014. № 11. С. 62-71.

52. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Динамические расчеты системы «Ветроэнергетическая установка-фундамент-основание». Учеб. пособие СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 54 с.

53. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Нагрузки на элементы ветроэлектрической установки, ее фундамент и основание. Учеб.пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ,1999.

54. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Расчет фундаментов ветроэнергетических установок. Часть 1. Монолитные железобетонные фундаменты мелкого заложения: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, 91 с.

55. Елистратов В.В., Кузнецов М.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч.1. Определение ветроэнергетических ресурсов региона. Методические указания. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003 г.

56. Емцев А.Н., Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Анализ эффективности использования ветроэнергетических установок в северных районах республики Саха (Якутия) // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 98-101
57. Есьман В.И., Ализаде А.С. Ветроэнергетические ресурсы Азербайджана. – Баку: Азэнергия, 1966. – 97 с.
58. Журавлёв Г.Г., Задде Г.О. Оценка ветроэнергетического потенциала кемеровской области. Вестник Томского государственного университета. №376, 2013 г., с.: 175-181.
59. Зинатуллин А.В., Чибисова Е.Ю. Развитие ветроэнергетики с экономической точки зрения. Стратегия устойчивого развития регионов России, № 5, 2011г., с.: 324- 328
60. Зуев Н. В. Новая модель расчета основных параметров ветродизельного комплекса // Механизация и электрификация сел. хоз-ва.- 2007.-N 5.-С. 21-22. Шифр П2151
61. Иванов В. М., Иванова Т. Ю., Бахтина И. А., Трутнев П. С. Оценка возможности развития ветроэнергетики в Алтайском крае с использованием зарубежных ветроэнергоустановок. Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. № 4/17, 2014 г., с.: 92-97
62. Иванов К. И. Жизнеспособность альтернативной энергетики в экономике России. Интернет-журнал науковедение. № 1 (20), 2014 г., с.: 1-11
63. Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Попов С. П., Петров Н. А. Малая энергетика Севера: Проблемы и пути развития. – Новосибирск: Наука, 2002. – 188 с.
64. Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Халгаева Н. А. Возобновляемые природные энергоресурсы: потенциал и перспективы использования. Всероссийский научный журнал «Регион: экономика и социология», 2010г. Спецвыпуск: «Топливо-энергетический комплекс Востока России: приоритеты, проблемы и механизмы реализации направлений развития». 308 с.

65. Информационное письмо об обязательной сдаче организациями бухгалтерской (финансовой отчетности и аудиторского заключения за 2018 год. Режим доступа: <http://sakha.gks.ru/>

66. Исследование эффективности новой схемы ветродизельного комплекса. Судаченко В.Н., Зуев Н.В., Папушин Э.А., Шаркова В.В.//Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве/Всерос. науч.-исслед. ин-т электрификации сел. хоз-ва.-Москва, 2006.-Ч. 4.-С. 222-227.- Библиогр.: с.227

67. Кадастр возможностей / Под. ред. Б. В. Лукутина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 280 с.

68. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения / Пер. с англ. – Х.: «Гуманитарный Центр», 2005. – 632 с.

69. Карамов Д. Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергокомплексов использующих возобновляемые источники и накопители энергии: Авториферет диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук/Д. М. Карамов. - Иркутск, 2016. -26 с.

70. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

71. Киселева С., Рафикова Ю., Шакун В. Использование ГИС-технологий в области возобновляемой энергетики//III Международная научно-практическая конференция «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». 2013. С. 97-106

72. Кисилёва С. В. Элементы мониторинга для оценки потенциала развития ветроэнергетики в России. Вестник РАЕН. № 6, 2012г., с: 41-48.

73. Киушкина В. Р. Децентрализованное электроснабжение районов Якутии с использованием энергии ветра: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/В. Р. Киушкина. -Томск, 2005. -207 с.

74. Ключкова Л. В., Сузан Д. В., Тишкин В. Ф., Вычислительные алгоритмы конвективного переноса токсичных веществ при математическом прогнозировании качества окружающей среды в мегаполисах, Известия РАН. Теория и Системы Управления, 2009, № 4, 163-176, Наука, М.;
75. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Выбор ВЭУ и оценка их производительности. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. № 11-12, 2005г., с.: 48-52
76. Кошелев А.А., Марченко О.В., Шведов А.П. Оценка целесообразности увеличения энергетического использования древесины // Изв. РАН. Энергетика, 1997, №4, с. 65–71
77. Кошелев А.А., Попов С.П., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Возобновляемые природные источники энергии: предпосылки и эффективность использования // Топливо-энергетический комплекс России: современное состояние и взгляд в будущее / Под. ред. А. П. Меренкова. – Новосибирск: Наука, 1999. – С. 279 – 298
78. Круглов С. Данные Google Earth в AutoCAD Civil 3D. САПР и графика. 2010. № 8 (166). с. 64-66
79. Кудря С.А., Щекин А.Р., Пепелов О.В. Усовершенствование законодательной базы развития возобновляемой энергетики. Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". № 8, 2011 г., с.: 140 – 145
80. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. Изд. второе, перераб. и доп. – М.: Логос, 2002. – 392 с.: ил.
81. Ларичев О. И., Мошкович Е. М. Качественные методы принятия решений. М.: Физматлит, 1996.
82. Ларичев О.И., Нарыжный Е.В., Петровский А.Б., Ройзензон Г.В., Стернин М.Ю., Шепелев Г.И. Разработка методов и систем принятия стратегических решений. Отчёт о НИР/НИОКР. Номер гранта (контракта): 95-01-00083. 1995г.

83. Лукутин Б. В., Сарсикеев Е. Ж., Сурков М. А., Ляпунов Д. Ю. Разработка систем регулирования каналов ветровой и дизельной генерации при параллельной работе на шине постоянного тока. Альтернативная энергетика и экология. № 14 (136), 2013 г., с.: 27-31;
84. Лукутин Б.В., Киушкина В.Р. Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии. -Томск: Изд-во ТПУ, 2006. -202 с.;
85. Марченко О.В. Математическая модель энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии // Изв. РАН. Энергетика, 2006, № 3, с.54-61.
86. Марченко О.В. Оценка экономической эффективности энергоисточников с учетом неопределенности исходных данных – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1995, 25 с. – Препр. СЭИ СО РАН, № 3.
87. Марченко О.В. Стоимость энергии и оптимальные параметры ветроэнергетических установок // Изв. РАН. Энергетика, 2000, № 2, с. 97–103.
88. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ области экономической эффективности ветродизельных электростанций // Промышленная энергетика, 1999, № 2, с. 49–53.
89. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ экономической эффективности возобновляемых источников энергии в децентрализованных системах энергоснабжения // Альтернативная энергетика и экология, 2009, № 5 (73), с. 78–84.
90. Марченко О.В., Соломин С.В. Вероятностный анализ экономической эффективности ветроэнергетических установок // Энергетика. Изв. РАН. – 1997. - №3. – С. 52 – 60.
91. Марченко О.В., Соломин С.В. Оптимизация автономных ветродизельных систем энергоснабжения // Электрические станции, 1996, № 10, с. 41–45.
92. Марченко О.В., Соломин С.В. Повышение эффективности энергоснабжения децентрализованных потребителей с применением

возобновляемых источников энергии и топливных элементов // Экология промышленного производства, 2008, № 1, с. 86–90.

93. Марченко О.В., Соломин С.В. Учёт надёжности при расчёте экономической эффективности ветродизельных энергосистем. – Иркутск, 1997. – 19 с. – (Препр./ СЭИ СО РАН, №3).

94. Марченко О.В., Соломин С.В. Экономическая эффективность автономной энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии и топливными элементами // Актуальные проблемы энергетики: мат. III межд. научно-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во "ИРА УТК", 2007, с. 395–398.

95. Марченко О.В., Соломин С.В. Экономическая эффективность ветроэнергетических установок в системах электро- и теплоснабжения – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1996, 28 с. – Препр. СЭИ СО РАН, № 2.

96. Марченко О.В., Соломин С.В. Экономическая эффективность ветроэнергетических установок в автономных энергосистемах // Энергетика России в переходный период: проблемы и научные основы управления / ред. А.П. Меренков – Новосибирск: Наука, 1996, с. 334–339.

97. Мастепанов А. М. Топливо-энергетический комплекс России на рубеже веков – состояние, проблемы и перспективы развития / Справочно-аналитический сб., 3-е изд., перераб. И доп. – Новосибирск: Наука, 2010. – 793 с.;

98. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция, исправленная и дополненная. Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477.

99. Методические указания по расчету и проектированию свайных фундаментов ветроэлектрических установок. АО Ленгидропроект. СПб, 1995, 81 с.

100. Методические указания по расчету и проектированию фундаментов ветроэлектрических установок на естественном основании. АО Ленгидропроект. СПб, 1995, 91с.

101. Методы и модели разработки региональных энергетических программ / Санеев Б. Г., Соколов А. Д., Агафонов Г. В. И др. – Новосибирск: Наука, 2003. – 140 с.;
102. Методы исследования и моделирования технических, социальных и природных систем: сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука 2003. – 319 с.;
103. Методы разработки ветроэнергетического кадастра. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 96 с.
104. Мингалеева Р.Д., Бессель В.В. Методика оценки суммарной мощности ветроэлектростанции. Территория нефтегаз. № 9, 2014г., с.: 84-88.
105. Минин В. А., Рожкова А. А. Оценка эффективности совместной работы дизельных электростанций с ветроэнергетическими установками. Электрические станции. № 6, 2014г.
106. Минин В.А. Основные элементы ветроэнергетического кадастра Севера // Проблемы энергетики Мурманской области и соседних районов. – Изд. Кольского филиала АН СССР, 1980. – С. 135–151.
107. Минин В.А., Рожкова А.А. Оценка эффективности совместной работы ВЭУ и ДЭС в прибрежных районах мурманской области//Малая Энергетика, 2014. -№1-2., с.: 98 -102;
108. Мишин В.Ф. Комплексная система энергоснабжения автономных потребителей с максимальным использованием энергии ветра. Энергетическое строительство. 1991, №3, с.62-64.;
109. Модели оптимизации развития энергосистем: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов/Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес, А. Л. Мызин/Под ред. Д. А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.: ил.;
110. Морозова Д.В., Крупнова Т.Г., Машкова И.В., Кострюкова А.М. Перспективы использования ветроэнергетики в Челябинской области. Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. №1, 2013 г., с.: 169 – 174;
111. Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии

[Электронный ресурс]: Дис. д-ра тех., наук: 05.14.08 .-М.: РГБ, 2003 (Из фондов Российской Государственной библиотеки).

112. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение / Пер. с англ. под ред. и с доб. Н.Н. Воробьева. М.: Наука, 1970. - 707с.

113. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Пособие для проведения практических занятий. /Сост. Хахалева Л.В. Ульяновск, 2008. – 32 с.

114. Николаев В. В. Исследование микромасштабных флуктуаций ветра применительно к созданию ветродизельных комплексов. Инновации в сельском хозяйстве. № 3 (8), 2014 г., с.: 209-214;

115. Николаев В. Г. Модели надёжности ветроэлектрических станций. Естественные и технические науки. №3, 2011г., с: 446-457;

116. Николаев В. Г., Ганага С. В. О возможности и эффективности использования ветро-азотных электростанций для автономного энергоснабжения. Альтернативная энергетика и экология. № 12, 2011г., с: 56-59;

117. Николаев В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов.— М., 2008.— 584 с.;

118. Николаев В.Г., Ганага С.В., Перминов Э.М. О возможностях и условиях широкомасштабного развития ветроэнергетики в России. Энергетик. №7, 2014 г., с.: 15-21;

119. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Рафикова Ю.Ю., Каргашина М.А., Манжиловский Ю.В. Воздействие объектов ветроэнергетики на окружающую среду. Геодезия и картография, № 10, 2013 г., с.: 39 – 44;

120. Новиков А. А., Полуяхтов В. А. К исследованию воздушных потоков в горах. Научный вестник московского государственного технического университета гражданской авиации. № 97, 2006 г., с.: 72-75;

121. Новосельцев В.И. Теоретические основы системного анализа. – М.: «Майор», 2006. – 592 с.
122. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 176 с.
123. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. Учебно-методическое пособие. – СПб.: «ЮТАС», 2007. – 104 с.
124. Нойбергер Н., Нолле О., Пивняк Г. Г. Состояние и перспективы развития ветроэнергетики / Электротехнические и компьютерные системы № 3, 2011 г., с: 362-364;
125. Нурпеисова Г. Б. Пакет прикладных программ для обоснования рациональных параметров ВЭУ. Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. №4, 2010г., с.: 215-220;
126. О некорректности метода анализа иерархий // Подиновский В.В., Подиновская О.В. Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8-13.
127. О. А. Касеева. Оценка ветрового энергетического потенциала Оренбургской области//Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2014. -№ 1. -С. 39-40.
128. Обухов С.Г. Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности. Альтернативная энергетика и экология, 2011, № 1.
129. Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2011, № 2.
130. Оленьков В. Д., Пузырев П. И. Численное моделирование ветрового воздействия на уникальные здания. Академический вестник уралниипроект РААСН. № 4, 2014г., с.: 87-89;

131. Отрощенко А. А. Исследование перспектив развития ветроэнергетики в России: региональный аспект. Наука и современность, № 15-1, 2012 г., с.: 131 – 134;
132. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году. Режим доступа: https://soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2019/ups_rep2018.pdf.
133. Оценка экономической эффективности электроснабжения потребителей труднодоступных районов Иркутской области на базе нетрадиционных источников: Отчёт / СЭИ СО РАН; Отв. исп. И.Ю. Иванова, Т.Ф. Тугузова. – Иркутск, 1996. – 85 с.
134. Панкратьев П. С. Поддержка принятия решений при многокритериальном двухуровневом выборе пунктов размещения электростанций [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.13.01) / Панкратьев Павел Сергеевич; ФГБОУ ВПО «БрГУ» - Иркутск, 2015. - 22 с.
135. Панкратьев П.С., Шакиров В.А. Многокритериальный выбор створа гидроэлектростанции на реке Индигирке в республике Саха (Якутия) // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 3 (15). – С. 71-80.
136. Панов Р. М., Беляков П. Ю. Оценка ветропотенциала местности с использованием архивов погоды интернета и его применение при выборе ветроэлектрической установки. Электротехнические комплексы и системы управления. № 3, 2009г., с.:60 – 64.
137. Панов Р.М., Беляков П.Ю. Оценка ветропотенциала местности с использованием архивов погоды интернета и его применение при выборе ветроэлектрической установки. Электротехнические комплексы и системы управления. №3, 2009 г., с.: 60-64.
138. Перспективы мировой ветроэнергетики. Сентябрь 2006. GWEC, Greenpeace International, DLR и Ecofys Consultancy 8

139. Пестрикова И.Е., Аникина Е.В., Кириленко Е.С., Конакбаева А.С., Пестриков М.Е. К вопросу о перспективах развития ветроэнергетики в России. Динамика систем, механизмов и машин, № 1, 2012 г., с.: 160-167; 43
140. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
141. Подиновский В.В., Подиновская О.В. Ещё раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 75-78. 244
142. Подтягин М.Е. Математический анализ измерений ветра//Геофизика, т.V, вып.1, 1935.
143. Постановление правительства от 20.10.2010 №850 « Критерии для предоставления из федерального бюджета субсидий для компенсации стоимости технического присоединения объектов с мощностью не более 25 МВт»;
144. Постановление Правительства РФ № 449 от 28.05.2013г. «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности»; 75
145. Постановление правительства РФ №426 от 03.06.2008 «О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования ВИЭ»;
146. Правительство российской федерации. Распоряжение от 11 ноября 2013 г. № 2084-р Москва.
147. Приказ Минэнерго РФ от 17.11.2008 №187 «О порядке выдачи и погашения сертификатов объектам ВИЭ»;
148. Пыхов П. А. Диагностика энергетической безопасности регионов России. Фундаментальные исследования. № 6-2, 2014 г., с.: 325-329;
149. Распоряжение Правительства №861 от 28.05.2013г. «О внесении изменений в Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года, утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 8

января 2009 г. № 1-р, и установлении предельных величин капитальных затрат на возведение генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии»

150. Распоряжение правительства от 05.05.2012г №744 «О подготовке проектов документов для объектов, функционирующих на оптовом рынке»; 73

151. Распоряжение Правительства от 08.01.2009 №1-р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года»;

152. Распоряжение Правительства РФ от 04.10.2012 г. №1839-р «Комплекс мер стимулирования развития использования ВИЭ»;

153. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 №1715 «О расширении производства энергии на основе ВИЭ»;

154. РД 52.04.275-89 Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Зарегистрирован ЦКБ ГМП за № РД 52.04.275-89 от 16.08.90 г.;

155. Региональная программа «Энергообеспечение северных территорий Иркутской области на базе энергоисточников, использующих возобновляемые природные энергетические ресурсы»: Науч. отчёт / ИСЭМ СО РАН; Отв. исп. С.П. Попов. – Иркутск, 2000. – 164 с.

156. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989 г.;

157. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

158. Рожко А. Оценка рамочных условий для реализации коммерческих проектов в сфере возобновляемой энергетики Украины. СХІД. № 4 (130), 2014 г., с.: 48 – 54;

159. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА.

160. Рыхлов А.Б. Ветроэнергетический потенциал на различных высотах приземного слоя атмосферы на юго-востоке европейской территории России. Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: науки о земле. Т.14, № 1, 2014 г., с.: 30-37;
161. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.
162. Самохина А.С., Сетуха А.В., Кирякин В.Ю., Марчевский И.К., Щеглов Г.А. Имитационная модель распространения поражающего агента в городской застройке. Управление большими системами: сборник трудов. № 20, 2008 г., с.: 77-94;
163. Санеев Б.Г., Клер А.М. и др. Направления и проблемы совершенствования энергетики Магаданской области в условиях рыночной экономики // Энергетика России в переходный период: проблемы и научные основы развития и управления / Под. ред. А.П. Меренкова. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 229 – 238.
164. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612735 Анализ ветроэнергетического потенциала. Коноплев Е.В., Гурницкий В.Н.
165. Сивицкая С. А. Стратегические направления инвестирования альтернативной энергетики в Украине. Бизнес. Образование. Право. Вестник волгоградского института бизнеса. № 4(25), 2013 г., с.: 171- 174;
166. Сидоров А. М. Моделирование обтекания ветровыми потоками техногенных препятствий. Успехи современного естествознания. № 4, 2006 г., с.: 86;
167. Симанков В.С., Бучацкий П.Ю. Программный модуль определения возможных объемов вовлечения возобновляемой энергии в региональный энергобаланс//Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2013. Вып. 1 (116). С. 105-111.

168. Симиу Э.,Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / Пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецово́й; под. ред. Б. Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с. с ил. Перевод. изд.: Wind Effects on Structures / E. Simiu, R. Scanlan (1978);
169. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
170. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
171. Смоленцев Д.О., Ивина О.Н. Сравнительная оценка энергоустановок малой мощности для децентрализованного энергоснабжения. Атомная энергия,2011, т. 111, вып. 5, С. 281-284.
172. СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия”, Госстрой СССР, М., 1987.
173. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. Госкомитет СССР по делам строительства, М., 1985.
174. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. Госкомитет СССР по делам строительства, М., 1986.
175. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. Госкомитет СССР по делам строительства, М., 1986.
176. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Госкомитет СССР по делам строительства, М., 1988.
177. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР, М., 1989.
178. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. Госстрой СССР, М., 1987.
179. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Госстрой СССР, М., 1987.

180. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. Госстрой СССР, М., 1987.
181. СНиП II-12-77. СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА. Часть II. НОРМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. Глава 12. ЗАЩИТА ОТ ШУМА. Утверждены постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 14 июня 1977 г. № 72.
182. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. Центральный институт типового проектирования, М., 1990.
183. СНиП II-7-00. Строительство в сейсмических районах. М., Стройиздат, 2000.
184. Соболева Е. К., Саразов А. В. Использование энергии ветра и солнца в Волгоградской области. Современные научные исследования и инновации. №5-1(37), 2014 г., с.: 41;
185. Справочник по климату СССР, Ч III, Ветер, Л., Гидрометеиздат, 1996
186. Справочник по климату СССР. Выпуск 24. Якутская АССР. Часть III. Ветер. Ленинград 1967г.
187. Стратегия социально – экономического развития Камчатского края до 2025 года. Москва 2009.
188. Стратегия социального и экономического развития Магаданской области на период до 2025 года. Г. Магадан 11 марта 2010 года.
189. Сурков М. А., Пуапасов-Максимов А. М., Чернов Д. М. Применение экспериментального программного комплекса «Power system simulation» и оценка возможности укрупненного зонирования территории российской федерации на оптимальные структуры комплексов с участием возобновляемых энергоресурсов. Интернет-журнал «Науковедение». 2012 г., № 3 (12)
190. Телегин В.В. Оптимизация структуры и параметров автономных электрогенерирующих комплексов. Фундаментальные исследования. № 8-2, 2013г., с.: 312-317.

191. Тишкин В. Ф., Беспалов М. С., Волкова Р. А., Ключкова Л. В., Мышецкая Е. Е., Никишин В. В., Попов И. В., Сузан Д. В., Филатов А. Ю. Разработка математических моделей и эффективных численных методов для прямых и обратных задач распространения загрязнений в атмосфере и в подземном пространстве. Отчет о НИОКР. Российский фонд фундаментальных исследований. Номер гранта (контракта): 96-01-00658;
192. Управление инвестпроектами ТЭС. Предынвестиционная фаза / Осика Лев Константинович. – М.: Вершина, 2009. – 344с.: ил., таб.
193. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. Общий курс. М.: Наука, 1964. – 816 с. с ил.;
194. Федеральный закон «Об Электроэнергетике» №35-ФЗ от 26.03. 2003;
195. Федеральный закон № 217-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»;
196. Федеральный закон №394-ФЗ от 06.12.11 — изменение ФЗ-35 «Об использовании рынка мощности и компенсации потерь в электрических сетях на розничном рынке»
197. Федеральный закон от 14 марта 1995 г. N 33-ФЗ "Об особо охраняемых природных территориях".
198. Фишберн П.С. Теория полезности для принятия решений / П. С. Фишберн / Пер. с англ. М.: Наука, 1977. – 352 с.
199. Фортов В., Попель О.. Возобновляемые источники в мире и России / Энергетический вестник / №16, 2013 г., с: 20-31.
200. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
201. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. 178 с.
202. Чепинога И. А., Пряшников Ф. Д. Моделирование ВЭС в системе matlab // Сборник тезисов Шестой Региональной студенческой научно-технической конференции "Современные проблемы в электроэнергетике". —

Севастопольский Национальный университет ядерной энергии и промышленности Севастополь, 2011. — С. 46–46.

203. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005.-416 с.

204. Чудинова О.Н., Горюнова О.С. Состояние и перспективы применения ветроэнергетических установок на территории республики Бурятия. Вестник ВСГУТУ. №2, 2014 г., с.: 44 – 48;

205. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Многокритериальный анализ эффективности эксплуатации ветровых и солнечных установок. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 254 с.;

206. Шакиров В.А. Многокритериальный анализ перспективного размещения ветроэнергетических установок на севере республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 1. С. 26-33;

207. Шакиров В.А., Артемьев А. Ю. Оценка ветроэнергетического потенциала района средствами компьютерного моделирования. Прикладная информатика. – 2015. – №4 (58). Т.10. – с. 93-104.

208. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11 (130). С. 133-143.

209. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Комплексный анализ эффективности ветроэнергетических установок в республике Саха (Якутия) // Ползуновский вестник. 2011. № 2-2. С. 162-166;

210. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind – MCA v. 1.00) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619044, опубл. 08.09.2014 РОСПАТЕНТ.

211. Шакиров В.А., Ноговицын Д.Д., Ефимов А.С., Шеина З.М., Сергеева Л.П. Анализ эффективности использования энергии ветра в северных районах республики Саха (Якутия) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 935;
212. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Многокритериальный двухуровневый подход к выбору лучшей альтернативы в рамках слабоструктурированной проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – №2. – С. 118-127.
213. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика.–2013. – №6 (48). – С. 111-121.
214. Шаркаева О. А. Некоторые причины торможения развития инновационной сферы России. Транспортное дело России. № 6, 2009 г., с.: 160-161;
215. Шелухеев Б.Н., Кобылкин Д.В., Цыбикдоржиев В.Д. О перспективах развития ветроэнергетики на восточном побережье оз. Байкал (район пос. Горячинск). Вестник Бурятского государственного университета. №3, 2007 г., с.:54 – 57;
216. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
217. Шкрадюк И. Э. Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире. 2010, М., WWF России. 88 с.;
218. Экономико-математические методы и модели принятия решений в энергетике / Лисочкина Т. В., Косматов Э. М., Ирешова А. и др.; Под. ред. П. П. Долгова, И. Климы. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1991. – 224 с.;

219. Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – 448 с.;
220. Энергетическая стратегия республики Саха (Якутия) на период до 2030 года / Правительство Респ. Саха (Якутия). – Якутск; Иркутск: Медиа-холдинг «Якутия», и др.; 2010. – 328 с.
221. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Прил. к обществ.-дел. журналу «Энергетическая политика» – М.: ГУ Институт энергетической стратегии, 2010. – 184 с.
222. Ada Inda, Jill Wu & Dan Zhou Dr. Emily Klein «Assessing the Hedging Value of Wind Against Natural Gas Price Volatility» , May 2014. Режим доступа: https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/8582/Inda_Wu_Zhoupercent20percent20Assessingpercent20thepercent20Hedgingpercent20Valuepercent20ofpercent20Wind.pdf?sequence=1
223. Amante, C., B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources And Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19-pp, March 2009. Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/docs/ETOPO1.pdf>
224. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2009: ASTER Global DEM Validation, Summary Report, http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf, last access April 2010
225. Avoiding fossil fuel costs with wind energy. A report by the European Wind Energy Association - March 2014;
226. Awerbuch S., Morthorst P. E. The Economics of Wind Energy. A report by the European Wind Energy Association. March 2009. Режим доступа: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf
227. Case Tötar. Wind simulations in WindPro 2.8. Paulina Kaivo-oja Yrkeshögskolan Novia. Enheten för forskning och utveckling / Vasa 2013, 43 p.; 87

228. Commercial Scale Wind Power Gains Momentum. Режим доступа: <http://www.northernpower.com>
229. **Erev L, Cohen B** . Verbal Versus Numerical Probabilities: Efficiency, Biases, And The Preference Paradox // Organizational behavior and human decision processes. 1990. № 45.
230. FlowVision Версия 3.08.04. Руководство пользователя. ООО ТЕСИС, 1999-2013. Москва, Россия, 348 с.
231. GEOEYE Support Services Department, 2006. Personal Communication. Режим доступа: https://www.forecastinternational.com/archive/disp_pdf.cfm?DACH_RECNO=990
232. Global Wind Report 2018. Режим доступа: <https://www.enerjiportali.com/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>
233. H. G. Beyer, T. Rüger, G. Schäfer, and H.-P. Waldl. Optimization of wind farm configuration with variable number of turbines. In Proceedings European Union Wind Energy Conference, Göteborg, pages 1073–1076, 1996;
234. Hernandez J., Crespo A. Wind turbine wakes in the atmospheric surface layer // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics and Its Applications. 1990. Vol. 3. P. 330–361.;
235. Hobbs B.F. A Comparison of Weighting Methods in Power Plant Siting. Decision Science, 1980, Vol. 11, No. 4, pp. 725-723.
236. Hobbs B.F., Meier P.M. Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods. Kluwer Academic, Boston, 2000. 257 p.
237. Hwang. W. T. Application of Multi-Attribute Utility Analysis for the Decision Support of Countermeasures in Early Phase of a Nuclear Emergency // Journal of Korean Association Radiation Protection, 2004, Vol. 29, No. 1, pp. 65-71.
238. J.F. Ainslie. Calculating the field in the wake of wind turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 27:213–224, 1988;
239. Karl j. Nilsson. Estimation of wind energy production in relation to orographic complexity. A reliability study of two conventional computer software /

Master of Science Thesis / CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. - Göteborg, Sweden, 2010, 83 p.;

240. Larichev O.I., Moshkovich H.M. Verbal decision analysis for unstructured problems. Kluwer Academic Publishers. Boston, 1997.

241. M.O.L. Hansen, J.N. Sørensen, and W.Z. Shen. Vorticity-velocity formulation of the 3D navier-stokes equations in cylindrical coordinates. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 41:29–45, 2003. J. Laursen, P. Enevoldsen, and S. Hjort. 3D CFD quantification of the performance of a multi-megawatt wind turbine. In The science of making torque from wind. Conference series, volume 75, 2007;

242. Mark Bolinger, Lawrence Berkeley «Revisiting the Long-Term Hedge Value of Wind Power in an Era of Low Natural Gas Price», National Laboratory Environmental Energy Technologies Division, March 2013. Режим доступа: <https://emp.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-6103e.pdf>

243. Meier, Peter H., Gresser, Stefan. Analysis of extreme wind conditions based on real wind measurements and verification via existing models. DEWEK 2010, 10th German Wind Energy Conference;

244. R.J. Barthelmie, S.T. Frandsen, O. Rathmann, K. Hansen, E.S. Politis, J. Prospathopoulos, D. Cabezón, K. Rados, S.P. van der Pijl, J.G. Schepers, W. Schlez, J. Phillips, and A. Neubert. Flow and wakes in large wind farms in complex terrain and offshore. In European Wind Energy Conference, 2008;

245. Renewable power generation costs in 2014, January 2015, IRENA; 23

246. RENEWABLES 2014 GLOBAL STATUS REPORT. Режим доступа: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

247. Richards P. J. & Mallison G. D. Simulation and visualization of the wind around downtown Auckland // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & Its Applications. 1994. Vol. 7. No. 1. p. 224–239;

248. Russo J. E., Rosen L. D, An eye fixation analysis of multialternative choice // Memory and cognition. - 1975. - Vol. 3, N 3. — P. 267-276.

249. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill. 1980. 287 p.
250. Simon H. The Sciences of the artificial. Third Edition. Cambridge, MA, MIT Press, 1996, 246 p
251. The shuttle radar topography mission. / Farr Tom G., Hensley Scott, Rodriguez Ernesto, Martin Jan, Kobrick Mike. // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26-29 Oct. 1999. Noordwijk. 2000, c. 361-363;
252. Tversky A., Kahneman D. Judgement under uncertainty: heuristics and biases. Science, 1974, No.185, pp. 1124-1131.
253. Using Wind Power to Hedge Volatile Electricity Prices for Commercial and Industrial Customers in New York, Final Report – May 14, 2003 for NYSERDA. Режим доступа: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8jJWQ2nwmo0J:https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/EERP/Renewables/using-wind-power-hedge-volatile-electricity-prices-summary.pdf+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ru>
254. Utility-Scale Wind and Natural Gas Volatility Uncovering the Hedge Value of Wind For Utilities and Their Customers. Lisa Huber /July 2012. Режим доступа: <http://resource-solutions.org/images/events/rem/presentations/2012/Seif.pdf>
255. Wind energy scenarios for 2020. A report by the European Wind Energy Association - July 2014. Режим доступа: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/scenarios/EWEA-Wind-energy-scenarios-2020.pdf>
256. Wind in power 2012 European statistics, February 2013. Режим доступа: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf
257. Winterfeldt D., Edwards W. Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.451.8472&rep=rep1&type=pdf>

258. WWEA publishes Half-year Report 2013, October 17, 2013. . Режим
доступа: <https://wwindea.org/blog/2013/11/17/wwea-publishes-half-year-report-2013/>.
259. WWEA publishes Half-year Report 2014, September 17, 2014. Режим
доступа: <https://wwindea.org/blog/2014/09/17/wwea-publishes-half-year-report-2014/>
260. WWEA Quarterly Bulletin/ CALL FOR PAPERS: 1ST WORLD
COMMUNITY POWER CONFERENCE, FUKUSHIMA, 3 NOVEMBER 2016.
Режим доступа: [https://energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f35/2016%20Offshore%20Wind%20Technologies %20Market%20Report.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f35/2016%20Offshore%20Wind%20Technologies%20Market%20Report.pdf)
261. 45% by 2030 - European Renewable Energy Council. Режим доступа:
<http://www.ewea.org/blog/2011/05/renewable-energy-target-of-45-by-2030-vital/>



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по учебной работе
Е.И. Луковникова
«21» июня 2019г.

о внедрении результатов НИР в учебный процесс

Результаты:

1. Усовершенствованная схема проведения исследований применения ВЭУ.
2. Методика поддержки принятия решений по выбору районов и площадок размещения ВЭС на основе методов многокритериального анализа MAUT и SMART.
3. Усовершенствованная методика многокритериального выбора альтернатив для условий неопределённости ЛППР в отношении критериальных оценок.
4. Методика определения площадок с высоким ветроэнергетическим потенциалом с двумя уровнями анализа на основе методов аэродинамического моделирования.

полученные при выполнении диссертационной работы «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода» выполненной в рамках специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы»

внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры Промышленной теплоэнергетики, протокол № 12 от «18» июня 2019 г.

Указанные результаты используются при подготовке бакалавров по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» по дисциплине «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», в качестве материала к лекциям

Указанные результаты НИР не являются итогом повышения квалификации.

Зав. кафедрой ПТЭ

Федяев А.А.

Исполнитель: ст. пр. кафедры ПТЭ

Артемьев А.Ю.

Согласовано:

И.о. начальника отдела ИСНТИ

В.В. Жмуров

Начальник
учебно-методического управления

Г.П. Нежевец

20.06.19 2019 г.

21.06.19 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю. на тему «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода»

ООО «СЭЛТЕХ» подтверждает использование результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю.

При разработке проектов внедрения ветроэнергетических установок используется программа для ЭВМ Wind-MCA, реализующая методические разработки диссертационной работы Артемьева А.Ю. С помощью программы Wind-MCA проводится анализ возможной и востребованной выработки электроэнергии опытных моделей ветроэнергетических установок, разрабатываемых ООО «СЭЛТЕХ», а также сравнение эффективности различных моделей ветроэнергетических установок. Программа Wind-MCA используется при сравнительной многокритериальной оценке районов и площадок установки ветроэнергетических установок при подготовке проектов и анализе возможных технических решений.

Директор ООО «СЭЛТЕХ», к.т.н.

12.06.15



А.В. Струмеляк



Приложение 3

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «БРИИЗ»

Гусев М.А.

«19» сентября 2019 г

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю. на тему «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода»

ООО «БРИИЗ» подтверждает использование результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю.

При разработке проектов внедрения ветроэнергетических установок используется программа для ЭВМ Wind-MCA, реализующая методические разработки диссертационной работы Артемьева А.Ю. С помощью программы Wind-MCA проводится анализ возможной и востребованной выработки электроэнергии опытных моделей ветроэнергетических установок, при проведении инженерно - гидрометеорологических изысканий ООО «БРИИЗ». Программа Wind-MCA используется при сравнительной многокритериальной оценке районов и площадок установки ветроэнергетических установок при подготовке проектов и анализе возможных технических решений.

Руководитель камеральной группы ООО «БРИИЗ»



Михайлова В.А.

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер ООО «Братский Бензин»

Попов А.М.



2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю. на тему «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода»

Настоящим Актом свидетельствуем в том, что результаты диссертационной работы Артемьева А.Ю. на тему «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода» использованы при анализе целесообразности внедрения ВЭУ, оценке экономической эффективности их эксплуатации, выборе наиболее эффективного места размещения ВЭУ на АЗС в поселках Эдучанка и Седаново (Усть-Илимский район), а также поселках Тангуй и Прибрежный (Братский район).

Анализ показал, что наиболее целесообразными местами размещения ВЭУ для резервного электроснабжения АЗС с учётом экономических, технических и эксплуатационных критериев являются АЗС в поселках Седаново и Тангуй.

Заместитель коммерческого директора

ООО «Братский Бензин»

Гордеева В.В.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов диссертационной работы Артемьева А.Ю. «Совершенствование методологии
оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного
подхода»

Результаты диссертационной работы Артемьева А.Ю. на тему «Совершенствование методологии оценки решений по вводу ветроэнергетических мощностей на основе системного подхода» использованы при анализе экономической целесообразности эксплуатации ВЭУ и сравнении мест размещения ВЭУ на лесопилках ООО «Сибирская пила»:

Анализ позволил выявить наиболее целесообразные места размещения ВЭУ, провести сравнительную оценку вариантов резервного электроснабжения лесопилок с учётом экономических и технических факторов.

Директор ООО «Сибирская пила»



Ефремов А.И.

«19» июня 2019г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014619044

**Многокритериальная оценка эффективности использования
ветроэнергетических установок (Wind-MCA v. 1.00)**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования "Братский государственный университет" (ФГБОУ
ВПО "БрГУ") (RU)*

Авторы: *Шакиров Владислав Альбертович (RU),
Артемов Андрей Юрьевич (RU)*

Заявка № **2014616746**

Дата поступления **11 июля 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 сентября 2014 г.**



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ

малых форм предприятий в научно-технической сфере

ДИПЛОМ

**Победитель программы “Участник молодежного
научно-инновационного конкурса” (“УМНИК”)**

Артемов Андрей Юрьевич

*Председатель
Наблюдательного совета*

*Генеральный директор
Фонда содействия развитию
малых форм предприятий
в научно-технической сфере*

И.М. Бортник

С.Г. Поляков

