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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Братский государственный университет»

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Шакиров Владислав Альбертович

Официальные оппоненты: **Обухов Сергей Геннадьевич,**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики, профессор

Тремясов Владимир Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра электрических станций и электроэнергетических систем, профессор

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита диссертации состоится «18» сентября 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» http://www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года, одним из направлений является использование нетрадиционных источников энергии, в том числе ветроэнергетических установок (ВЭУ). В схеме территориального планирования Российской Федерации в области энергетики намечен ввод 1030 МВт мощностей ВЭУ к 2025 году, а к 2030 году – 6060 МВт. При вводе ветроэнергетических мощностей встаёт ряд важных задач, из которых особое значение имеют задачи принятия решений: выбора района размещения ветроэлектростанций (ВЭС), выбора площадки размещения ВЭС, выбора количества и моделей ВЭУ.

Степень разработанности. 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. Окороков, Н.А. Петров, Б.Г. Санеев, 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, который позволяет учесть предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР). Формализация предпочтений ЛПР усложняется слабой структурированностью и неопределенностью информации.

Важным направлением совершенствования анализа является повышение точности экономической оценки проекта. В существующих исследованиях расчёт ветропотенциала проводится на основе статистически обработанных данных метеостанций без детального учёта влияния рельефа местности. Рельеф местности вносит локальные изменения в общий ветровой режим. Требуется анализ на базе аэродинамических расчётов цифровой модели рельефа местности.

Таким образом, необходимо дальнейшее развитие существующего методического и программного обеспечения для решения ряда задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей.

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.

Объектом исследования является оценка эффективности ввода ветроэнергетических мощностей.

Предметом исследования являются методы многокритериального анализа и аэродинамического моделирования при оценке решений по вводу ветроэнергетических мощностей.

Научную новизну диссертации составляют:

1. Усовершенствованный и реализованный в схемном решении подход к проведению оценки эффективности применения ВЭС с использованием статистически необработанных данных метеостанций, учетом факторов воздействия на окружающую среду, влияния рельефа местности.

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.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии многокритериального подхода к обоснованию решений по выбору района и площадок для размещения ВЭС с учетом неопределенности условий развития района, результатов аэродинамического моделирования.

Практическая значимость работы заключается в разработке модулей системы поддержки принятия решений (СППР) «Wind-MCA», реализующих методики многокритериального выбора района и площадок ВЭС и повышающих точность оценки ветроэнергетического потенциала 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».

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с применением теории и методов системного анализа, принятия решений, теории полезности, теории вероятностей, методов аэродинамического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

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 MAUT и методов группы SMART с возможностью учета неопределенности информации.

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, «Программный комплекс системного анализа эффективности эксплуатации ветровых и солнечных установок».

Степень достоверности 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 результатов 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 неопределенности предпочтений ЛПР. 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 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

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».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность, цель и задачи исследования. Сформулирована научная новизна, положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы. Приведена краткая характеристика основных разделов диссертации.

В **первой главе** проведён анализ состояния, проблем и перспектив развития ветроэнергетики России. Проведён анализ методической и нормативной базы для решения задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей. Выдвинуты предложения по совершенствованию:

1. Повышение точности экономической оценки проектов ВЭС учетом рельефа местности, данных о потребителе, ВЭУ, погодных условиях и др.

2. Многокритериальный подход при выборе площадок и районов для размещения ВЭС с учетом неопределенности предпочтений ЛПР.

Основой для совершенствования стала известная схема проведения исследований по оценке эффективности применения ВЭС, разработанная в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН. В схеме выделено три блока: I – формирование исходных данных; II – расчёт выработки электроэнергии ВЭС; III – оценка эффективности применения ВЭС в районе. На рисунке 1 выделены предлагаемые автором новые составляющие блоков.

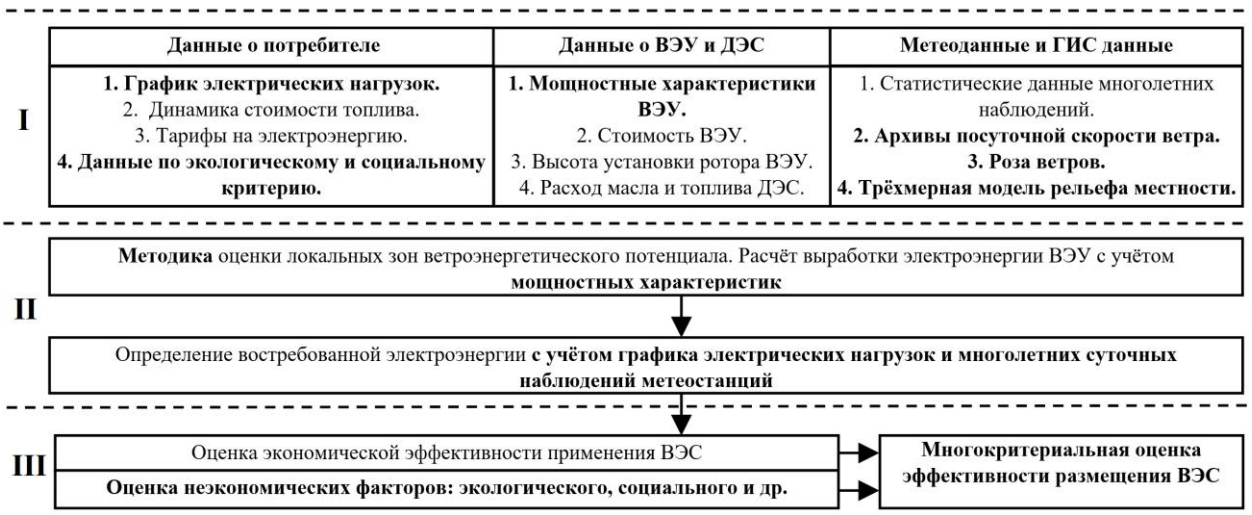


Рисунок 1. Схема проведения исследований по многокритериальной оценке эффективности применения ВЭС

Для повышения точности экономической оценки проектов ВЭС предложено **в блоках I и II:**

1) Использовать геоинформационные данные для моделирования трёхмерной поверхности рельефа местности исследуемого района для поиска зон с повышенным ветроэнергетическим потенциалом методами аэродинамического моделирования.

2) Использовать характерные суточные графики нагрузки потребителя с учетом сезонных изменений. Определять востребованную энергию ВЭУ совмещением графиков электрических нагрузок и скорости ветра.

3) Использовать реальные мощностные характеристики ВЭУ для повышения точности расчета выработки при различной скорости ветра.

4) Использовать статистически необработанные архивы многолетних наблюдений метеостанций за скоростью и направлением ветра. При этом появляются возможности:

- задания соответствия скорости и направления ветра при аэродинамическом моделировании ветрового потока с учетом рельефа местности;
- совмещения графика нагрузок потребителя и выработки ВЭУ;
- получения дополнительных статистических показателей.

5) При формировании данных учитывать информацию, необходимую для оценки экологического и социального воздействия ВЭУ.

Для повышения качества принимаемых решений предложено **в блоке III** проводить многокритериальный анализ вариантов размещения ветроэнергетических мощностей.

Также, в первой главе проведён обзор программных продуктов для решения задач ввода ветроэнергетических мощностей. Целесообразна разработка специализированного программного обеспечения для многокритериального выбора места размещения ВЭС с оценкой ветропотенциала, учетом рельефа местности, анализа моделей ветроэнергетических установок, возможной и востребованной выработки энергии, учёта неэкономических факторов.

Для поддержки принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей в исследовании рассмотрены методы многокритериального выбора, обозначены требования, которым они должны удовлетворять для решения данных задач. В результате был выбран метод MAUT. Методы группы SMART выбраны для вспомогательного использования при сравнении альтернатив по субкритериям.

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

1. Методика многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС на основе метода MAUT и методов группы SMART (рис. 2).

2. Методика принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении ценности оценок по критериям (рис. 4).

3. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала (рис. 7) на основе аэродинамического моделирования ветрового потока на трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района.

Многокритериальная задача размещения ВЭС формулируется следующим образом: существует множество альтернатив выбора $A=\{a_1, a_2, ..., a_k\}$, которыми являются районы или площадки размещения ВЭС. Для их оценки сформировано множество критериев $F=\{f_1, f_2, ..., f_n\}$, некоторые из которых могут быть комплексными и включать множество субкритериев $S_i=\{s_{i1}, s_{i2}, ..., s_{ip}\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом оценок по критериям множества F и подмножеств S_i.

На рис. 3 представлена методика многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС на основе MAUT и методов группы SMART.

1	Формирование иерархии целей при размещении ВЭС
2	Формирование альтернатив $A=(a_1, a_2, ..., a_k)$
3	Формирование критериев $F=(f_1, f_2, ..., f_n)$ и субкритериев $S_i=\{s_{i1}, s_{i2}, ..., s_{ip}\}$
4	Проверка условий независимости MAUT
5	Сравнение альтернатив по субкритериям методом группы SMART
6	Построение однокритериальных функций полезности $u_i(y_i)$ или ценности $v_i(y_i)$.
7	Оценка шкалирующих коэффициентов критериев
8	Многокритериальная оценка альтернатив
9	Анализ чувствительности полученных оценок
10	Ранжирование альтернатив

Рисунок 2. Методика многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС на основе метода MAUT и SMART

На первых этапах, в соответствии с методом MAUT, выполняется формирование иерархии целей, альтернатив, критериев и субкритериев. Далее производится оценка альтернатив по выбранным критериям и субкритериям.

Для проверки условия применимости метода MAUT в исследовании на этапе 4 необходимо удостовериться в выполнении для ЛПР условий-аксиом MAUT. При выполнении условий взаимной независимости по полезности можно получить многокритериальную функцию полезности $u(y)$ в аддитивном (1) или мультипликативном (2) виде:

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

$$ku(y)+1=ku(y_1,y_2,...,y_n)+1=\prod_{i=1}^{n}[kk_iu_i(y_i)+1], \quad (2)$$

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

При выборе альтернатив в условиях определённости исходной информации используют функцию ценности $v(y)$. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению позволяет получить ее в аддитивном виде:

$$v(y)=v(y_1,y_2,\ldots,y_n)=\sum_{i=1}^{n}k_iv_i(y_i), \quad (3)$$

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

Область эффективного применения метода MAUT ограничивается количеством критериев в связи с возрастающими трудозатратами на выполнение проверок независимости, построение функций ценности и определение шкалирующих коэффициентов. В этой связи, при использовании метода формируются комплексные критерии, включающие в свой состав несколько влияющих параметров или субкритериев. Каждую альтернативу необходимо оценить по субкритериям и выразить ее ценность по комплексному критерию. Для реализации этой локальной процедуры предложено использовать более легкий для ЛПР по сравнению с MAUT эвристический метод из группы SMART. Идея метода заключается в вычислении общей ценности $u(A_i)$ каждой альтернативы A_i как взвешенной суммы частных ценностей:

$$u(A_i)=\sum_{q=1}^{n}\omega_q u_q(A_i), \quad (4)$$

где ω_q – вес субкритерия s_q; $u_q(A_i)$ – оценка альтернативы A_i по субкритерию s_q.

Веса субкритериев в методе SMART определяются по выражению:

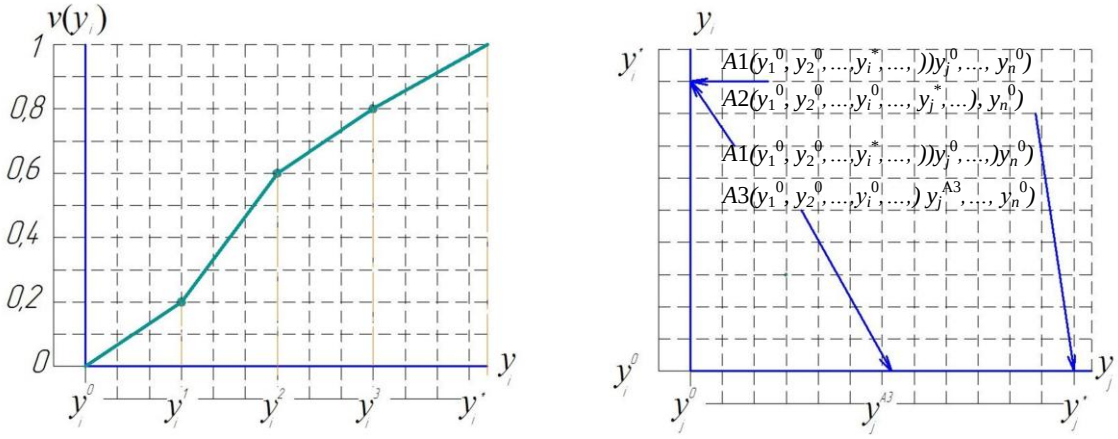
$$\omega_q=\frac{b_q}{\sum_{j=1}^{n}b_j}, \quad (5)$$

где b_q – значимость субкритерия s_q в баллах.

Использование методов группы SMART существенно снижает количество запросов к ЛПР при определении важности критериев, кроме того, не проводятся проверки условий-аксиом. Применение методов группы SMART на этапе 5 позволяет реализовать многокритериальное сравнение альтернатив методом MAUT в ситуации с большим числом критериев, агрегированных в комплексные.

На шестом этапе выполнено построение однокритериальных функций полезности $u(y_i)$ или ценности $v(y_i)$ (рис. 3*а*). По каждому критерию худшей оцен-

ке y^0 присваивается ценность 0, а лучшей оценке y^* присваивается 1. Промежуточным оценкам по критерию назначается ценность от 0 до 1.



а) *б)*

Рисунок 3. *а)* построение однокритериальной функции ценности;
б) оценка шкалирующих коэффициентов

Для оценки шкалирующих коэффициентов (рис. 3*б*, этап 7) формируются альтернативы: А1 с лучшей оценкой y_i^* по критерию f_i и худшей y_j^0 по f_j, А2 с худшей оценкой y_i^0 по критерию f_i и лучшей y_j^* по f_j. Оценки альтернатив А1, А2 по остальным критериям $y_1^0, y_2^0, \ldots, y_n^0$ фиксируются на худшем уровне. ЛПР предлагается определить лучшую альтернативу. Например, при выборе А2, далее определяется альтернатива А3 с худшей оценкой по f_i, такую, что она будет равноценна проигравшей альтернативе. Это позволяет составить уравнение:

$$k_i = k_j v_j(y_j^{A3}) \,. \tag{6}$$

В результате сопоставления пар критериев формируется система линейных уравнений и определены все шкалирующие коэффициенты. Итак, определив вид функции полезности (ценности), ее шкалирующие коэффициенты и однокритериальные функции, производится оценка по всем альтернативам, на основе (1), (2) или (3) (этап 8, рис. 2).

На этапе 9 проводится анализ чувствительности оценок альтернатив к изменению исходных данных и предпочтений ЛПР. Ввиду того, что принятие решений по размещению ВЭС сопровождается высокой неопределенностью информации о будущих условиях в районе размещения на перспективу до 25 лет, а также необходимостью учета интересов различных сторон принятия решения, ЛПР затруднительно выразить предпочтения точными оценками. Так как варьирование полезности (ценности) на завершающем этапе изменением $u_i(y_i)$ или $v_i(y_i)$ в (1), (2) или (3) некорректно, поскольку оно влияет и на шкалирующие коэффициенты (см. (6)), предложены следующие изменения в методе MAUT (рис. 4, серым цветом выделены новые процедуры). На этапе 2 вводится новая

процедура, которая позволяет учитывать неопределённость ЛПР в отношении ценности оценок по критериям путем задания интервального значения. Например, на рисунке 5*а* для оценки y^2_i *i*-го критерия ЛПР определило две возможные ценности $v_a(y^2_i)$ и $v_b(y^2_i)$, в результате сформировав интервал: $[v_a(y^2_i), v_b(y^2_i)]$. На этапе 3 интервалы разбиваются на множество оценок *p* с формированием группы однокритериальных функций ценности (рис.5*б*).

1	Формирование иерархии целей и критериев, оценка альтернатив, проверка условий-аксиом, требуемых MAUT
2	Построение однокритериальных функций ценности
	с возможностью задания интервалов ценности
3	Разбиение интервалов на множество оценок с формированием группы однокритериальных функций ценности
4	Определение шкалирующих коэффициентов
	по группе однокритериальных функций ценности для всех возможных вариантов предпочтений ЛПР
5	Получение многокритериальной функции ценности
	для каждого варианта предпочтений ЛПР
6	Анализ изменений многокритериальных оценок альтернатив в зависимости от вариантов предпочтений

Рисунок 4. Методика принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости ЛПР в отношении ценности оценок по критериям

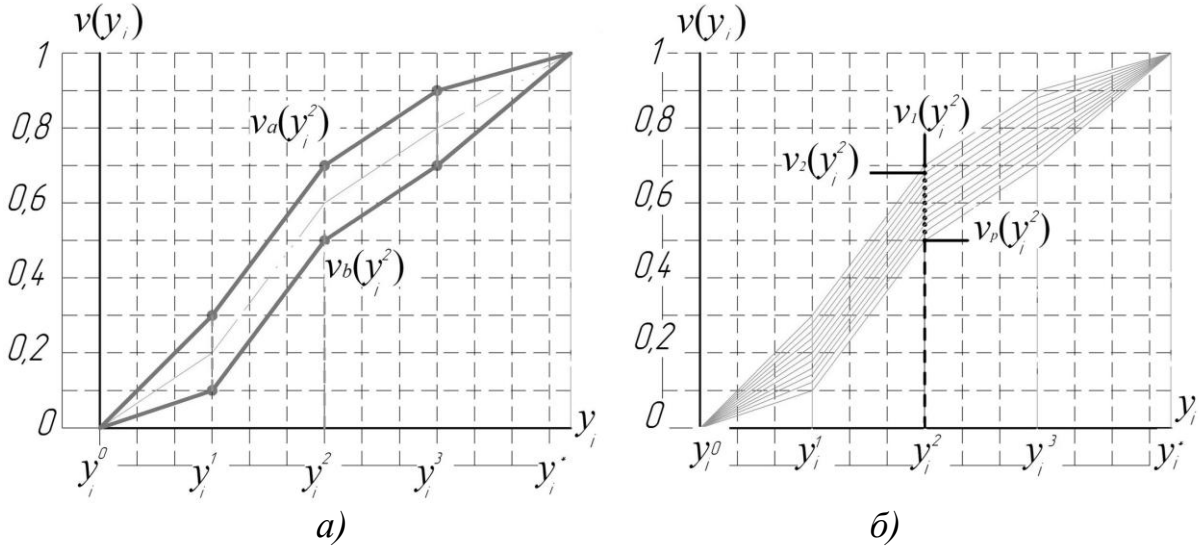


Рисунок 5. Процедура построения функции с интервальным заданием ценности: *а*) задание интервалов ценности оценкам по критерию; *б*) разбиение интервалов на *p* значений и формирование *p* функций ценности.

Разбиение интервала на *p* оценок при *n* критериях приводит к формированию $q=p^n$ вариантов функций ценности. На четвёртом этапе (рис. 4) проводится определение шкалирующих коэффициентов. Особенностью этого этапа являет-

ся то, что шкалирующие коэффициенты также будут определяться в некотором интервале. Поэтому формируется q систем линейных уравнений с шкалирующими коэффициентами.

Далее на пятом этапе, вследствие замены интервалов множеством оценок, будет получено q вариантов многокритериальных оценок альтернатив. В результате соединения линиями всех вариантов многокритериальных оценок каждой альтернативы получены графики, представленные на рисунке 6.

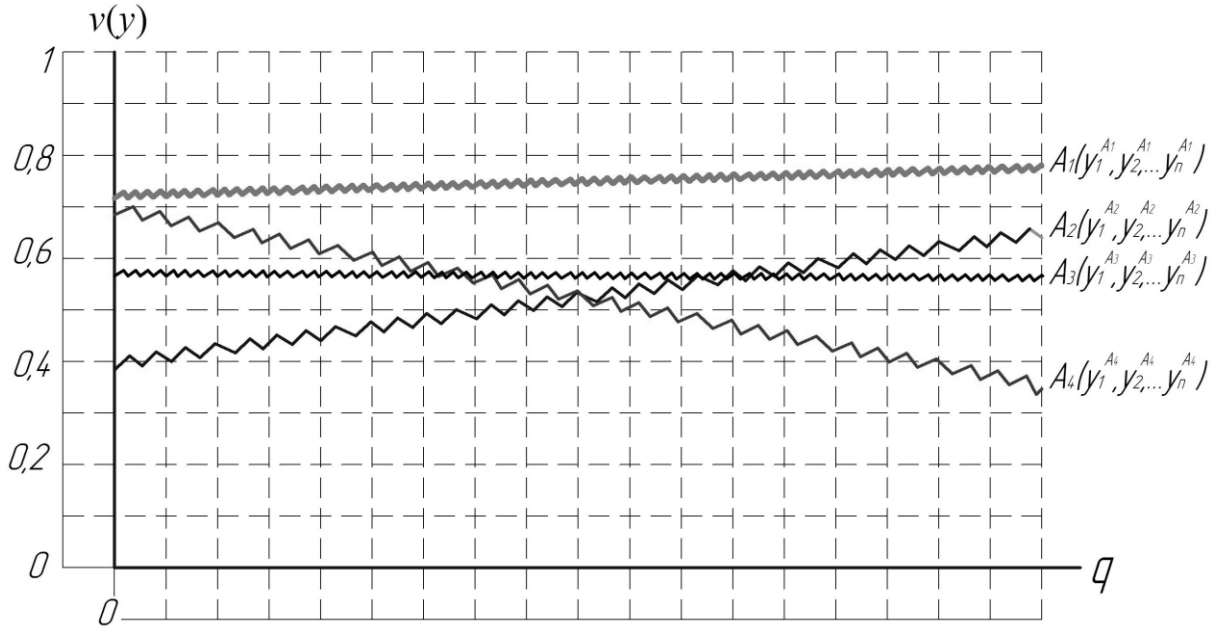


Рисунок 6. Многокритериальные оценки альтернатив при интервально заданной ценности критериальных оценок

В полученных результатах уже заложен анализ чувствительности к изменениям предпочтений ЛПР в отношении ценности оценок по критериям.

Сравнение вариантов предлагается проводить по двум показателям:

1) Среднее значение многокритериальных оценок альтернативы – отражает её эффективность с учетом всех вариантов предпочтений ЛПР:

$$< v > (y_i) = \frac{\sum_{t=1}^{q} v_t (y_i)}{q}, \qquad (7)$$

где y_i – вектор оценок по критериям альтернативы i; $v_t(y_i)$ – многокритериальная функция ценности, соответствующая t-му варианту предпочтений ЛПР.

2) Коэффициент устойчивости альтернативы:

$$K_i^{\text{уст}} = \frac{v_{max}(y_i)}{v_{max}(y_i) - v_{min}(y_i)} \qquad (8)$$

где $v_{max}(y_i)$, $v_{min}(y_i)$ – максимальное и минимальное значения из q вариантов многокритериальных функций ценности i альтернативы с вектором оценок y_i.

При сравнении альтернатив с близкими значениями $v(y)$ следует отдать предпочтение варианту с большим коэффициентом устойчивости.

Методика принятия решений на основе метода MAUT с учётом неопределённости предпочтений ЛПР дополняет методику многокритериального выбора района и площадки ВЭС. Методика направлена на решение трудностей, возникающих у ЛПР при задании точных значений ценности экономических, экологических и социальных оценок проектов ВЭС.

Следующей задачей, решаемой в диссертации, является разработка методики определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала для повышения эффективности выработки электроэнергии ВЭУ (рис. 7).

<table>
<tr><td>1</td><td colspan="2">Формирование исходных данных</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">Предварительный анализ и выбор районов для размещения ВЭС</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">Построение трёхмерной модели рельефа местности исследуемого района</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">Аэродинамическое моделирование.
Определение коэффициентов изменения скорости ветра по направлениям ветра</td></tr>
<tr><td>5.1</td><td>Формирование массива уточненных скоростей ветра с учётом K_i^d</td><td>5.2 Определение эффективности площадки по 8 направлениям с учётом K_i^d</td></tr>
<tr><td>6.1</td><td>Экономический анализ по уточнённым скоростям ветра</td><td>6.2 Определение перспективных площадок по коэффициенту $R_{i\Sigma}$</td></tr>
</table>

Рисунок 7. Методика определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала

На этапе 1 формируются исходные данные. Предложено два варианта степени детализации, поэтому исходные данные будут отличаться: расчёт на основании статистически необработанных данных (рисунок 7, этап 5.1; 6.1); на основании статистически обработанных данных (рисунок7, этап 5.2, 6.2). Для двух вариантов расчёта соответственно, исходными данными служат: 1) массив данных о скоростях V_j и направлениях ветра d_j в j-ые моменты времени за рассматриваемый период; 2) среднегодовые скорости ветра $V^d_{\text{срг}}$ по восьми направлениям и повторяемость ветра P^d по восьми направлениям за рассматриваемый период в районе, где d – одно из восьми направлений ветра: С, С-В, В, Ю-В, Ю, Ю-З, З, С-З.

На этапе 2 предварительный выбор районов осуществляется на основании предложенных методик (рис. 2, 4).

На этапе 3, с использованием различных баз данных (SRTM, ASTER GDEM, ETOPO1 и др.) о рельефе поверхности земли, строится трёхмерная модель выбранного района и подготавливается для экспорта в программный комплекс аэ-

родинамического анализа. Размер области построения и её детализация определяется на основании доступных вычислительных ресурсов и целесообразной возможной удаленности ВЭС от центра электрических нагрузок.

На этапе 4 производится аэродинамическое моделирование ветрового потока в условиях выбранного рельефа местности, и намечаются альтернативные площадки для размещения ВЭС. Получение коэффициентов изменения скорости ветра под воздействием рельефа местности для каждой *i*-ой площадки предлагается проводить по формуле:

$$K_i^d = \frac{V_i^d}{V_{\text{срг}}^d} \tag{9}$$

где V_i^d – скорость ветра в направлении *d* над *i*-ой площадкой, полученная по результатам моделирования скорости ветрового потока; $V^d_{\text{срг}}$ – среднегодовая скорость ветра в направлении *d*, используемая как начальная скорость при моделировании.

На этапе 5.1 для каждой *i*-ой площадки проводится уточнение скоростей ветра V_j с учетом коэффициентов K_i^d:

$$V_{ij}^d = K_i^d \cdot V_j \tag{10}$$

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

$$R_i^d = P^d \cdot K_i^d \tag{11}$$

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.

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

Таким образом, используя методику (рис. 7), проводится определение площадок с высоким ветроэнергетическим потенциалом на основе данных о рельефе местности, скорости и направлении ветра.

В **третьей** главе предложена структура СППР для задач ввода ветроэнергетических мощностей. Рассматриваются особенности разработанной в среде Delphi с участием автора СППР «Wind-MCA». Программа имеет модульную структуру, возможность сохранения и загрузки данных, графического представления полученных результатов (рис. 8, 9). Программа включает четыре модуля: анализа ветроэнергетического потенциала, анализа ветроэнергетических установок, экономического анализа, многокритериального анализа.

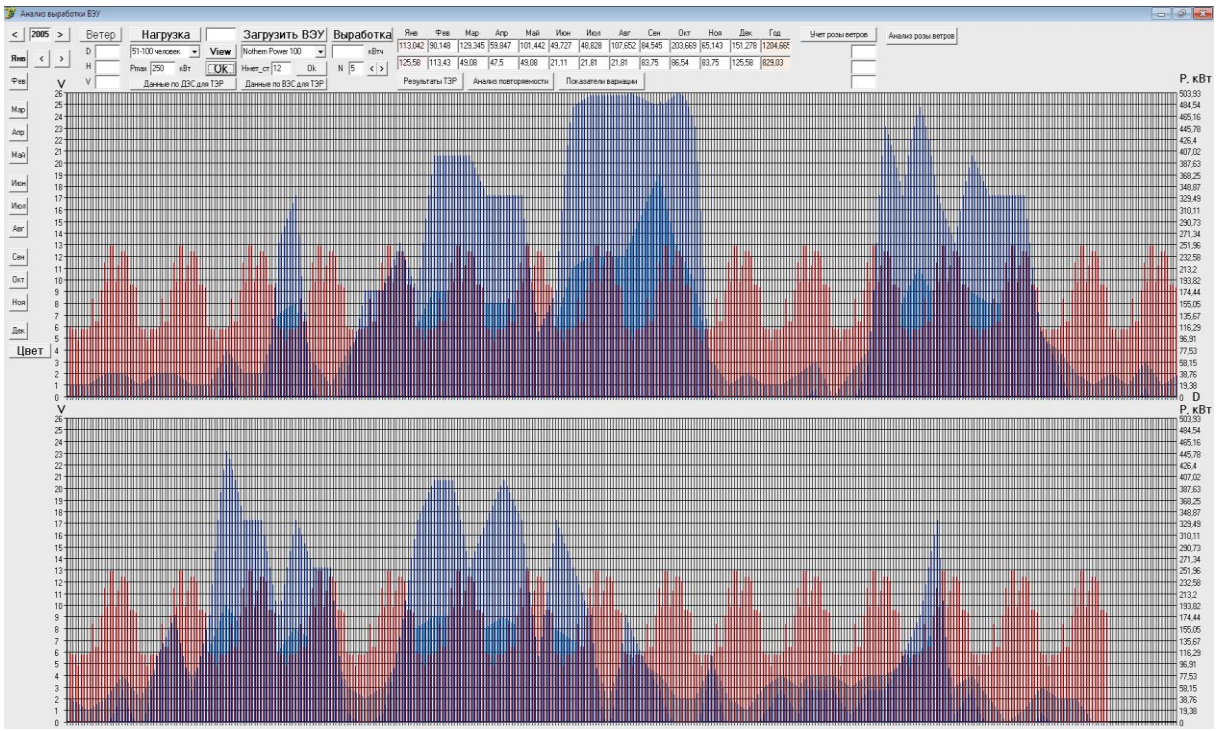


Рисунок 8. Скриншот окна программы «Wind-MCA»: наложение графика ветра (голубой цвет), выработки электроэнергии ВЭУ (синий цвет) и электрической нагрузки (красный цвет).

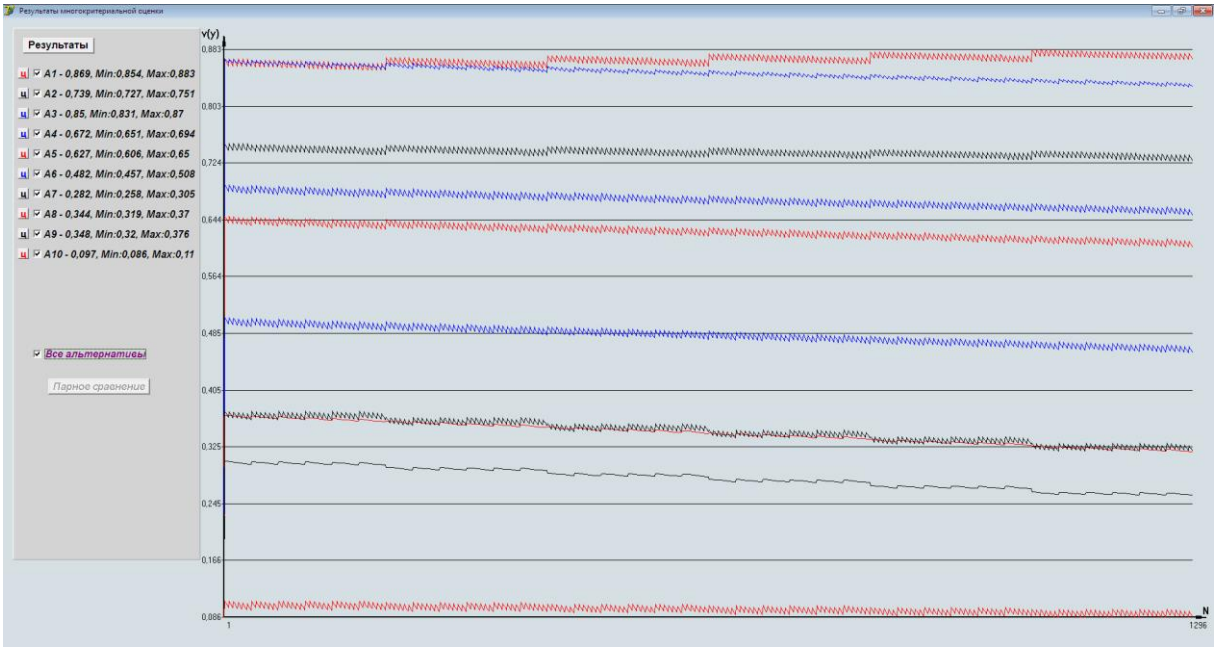


Рисунок 9. Скриншот окна программы «Wind-MCA»: многокритериальная оценка альтернатив с учетом неопределенности предпочтения ЛПР

Рассмотрена возможность применения предлагаемых методик и программы для ЭВМ на задачах, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей (рис. 10). Проводится исследование качества решений, получаемых с помощью предлагаемых методик (рис. 2, 4, 7) и СППР «Wind-MCA».

Для проведения многокритериального выбора районов размещения ВЭС с учётом неопределённости предпочтений ЛПР были выбраны северные районы республики Саха (Якутия). Исследование проводилось в три этапа:

1. Сравнение районов размещения ВЭС с использованием одного критерия – экономической эффективности.

2. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭС с дополнительным учётом экологического, социального критериев и критерия стабильности скорости ветра.3. Многокритериальная оценка районов размещения ВЭС с учётом неопределённости предпочтений ЛПР.

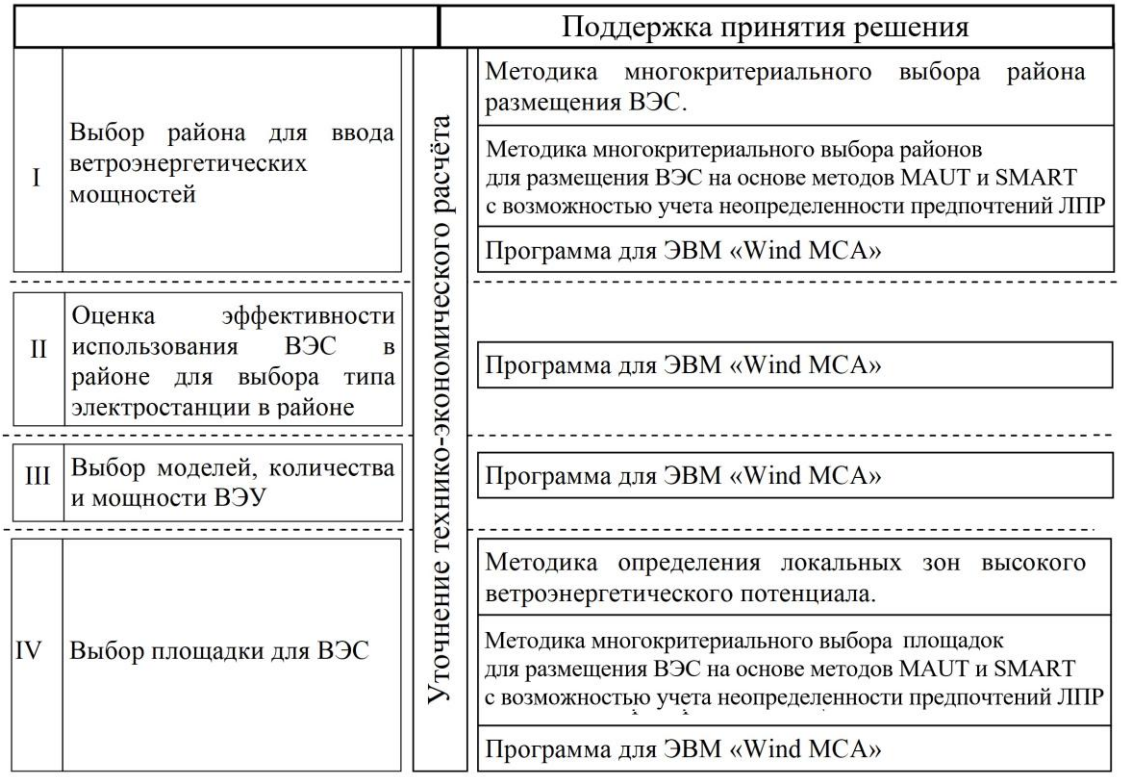


Рисунок 10. Предлагаемые автором решения в рамках задач, возникающих при вводе ветроэнергетических мощностей

Для многокритериального анализа была составлена иерархия целей и критериев (рис. 11).

Результаты анализа оценки районов в республике Саха (Якутия) представлены в таблице 1. Несмотря на высокую ценность экономического критерия, ранжирование районов изменяется при многокритериальной оценке. Также методика учета неопределённости предпочтений ЛПР помогла выявить устойчивые к изменениям предпочтений районы размещения ВЭС.

Можно выделить три альтернативы, имеющие высокие показатели: Тикси, Усть-Оленёк, Быков Мыс. Последний при учёте неэкономических критериев даёт результаты лучше, чем у опережающего его по экономическому критерию Усть-Оленёк.

Иерархия целей и критериев задачи выбора района для размещения ВЭС					
1	Максимизация экономической эффективности работы ВЭС	→	f_1		Чистый дисконтированный доход
2	Максимизация стабильной работы ВЭС	→	f_2		Коэффициент вариации средней скорости ветра
3	Максимизация положительного влияния на уровень социального развития в районе	→	f_3	s_1	Динамика численности населения
				s_2	Наличие инвестиционных проектов
				s_3	Численность населения
4	Максимизация положительного влияния на экологическую обстановку в районе	→	f_4		Близость природоохранных территорий

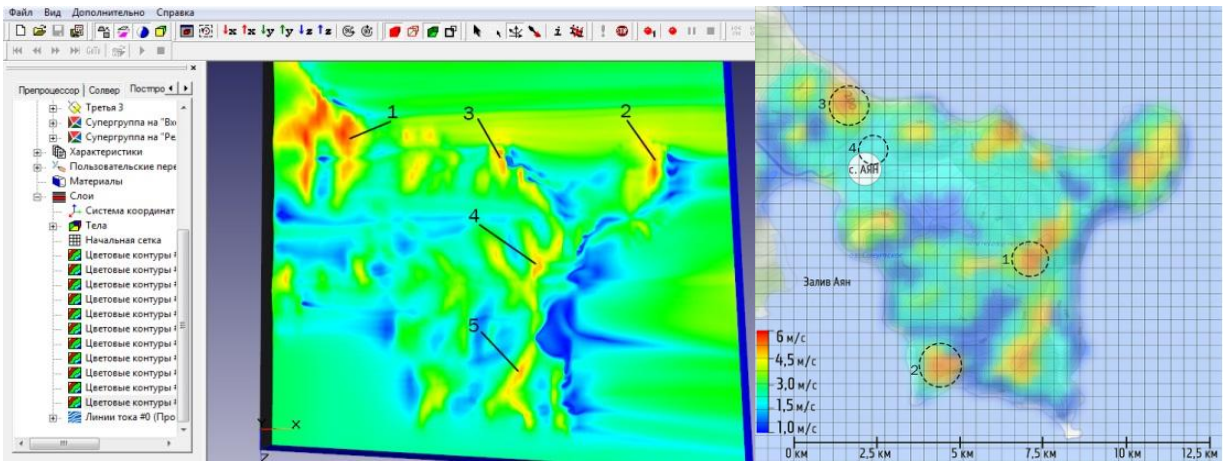
Рисунок 11. Иерархия целей и критериев задачи выбора района размещения ВЭС

Таблица 1 – Результаты оценки районов размещения ВЭС

Пункт	Оценка по критерию f_1	$v(y)$	$v(y)_{\text{сред}}$	$v(y)_{\min}$	$v(y)_{\max}$	$K_{\text{уст}}$
Тикси	1,000	0,868	0,863	0,854	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

Для многокритериального выбора площадки с использованием аэродинамического моделирования был выбран район п. Аян Хабаровского края. На первом этапе в соответствии со схемой (рисунок 1) был составлен массив исходных данных п. Аян и произведён расчёт ЧДД, который показал неэффективность применения ВЭУ. С помощью доступных геоинформационных данных составлена трёхмерная модель исследуемой местности, и в программном комплексе FlowVision 3.0. проведено аэродинамическое моделирование воздушных потоков с восьми сторон. Так, на рисунке 12*а* показан выбор наиболее эффективных площадок при западном ветре. Аналогично выполнено моделирование ветрового потока для восьми направлений. Таким образом, для дальнейшего сравнения были выбраны 4 площадки (рис. 12*б*).

Результаты аэродинамического моделирования отражены в таблице 2. Коэффициенты K_i^d отражают степень изменения скорости ветра из-за рельефа местности.



а) *б)*

Рисунок 12. *а)* скриншот окна постпроцессора FlowVision 3.0. Определение наиболее эффективных областей на расстоянии 30 м от поверхности земли при западном ветре; *б)* определение эффективных зон ветроэнергетического потенциала с учётом восьми направлений розы ветров.

Таблица 2 – Коэффициенты изменения скорости ветра по восьми направлениям для выбранных площадок

№ площадки	Значение параметра								$R_{i\Sigma}$
	$K_i^{с}$	$K_i^{с-в}$	$K_i^{в}$	$K_i^{ю-в}$	$K_i^{ю}$	$K_i^{ю-з}$	$K_i^{з}$	$K_i^{с-з}$	
№ 1	1,94	1,80	1,51	1,64	1,74	1,66	1,58	1,50	2,81
№ 2	2,16	1,71	1,69	1,57	1,63	1,50	1,37	1,21	2,71
№ 3	1,62	1,54	1,42	0,9	1,21	1,24	1,20	1,30	2,19
№ 4	1,20	0, 84	0,78	0,49	0,80	0,92	1,10	0,60	1,42
P^d	0,074	0,424	0,077	0,009	0,051	0,229	0,1	0,036	---

После определения коэффициентов изменения скорости ветра, в соответствии с методикой (рис. 7) был произведён перерасчёт ЧДД с учётом розы ветров в данном районе (табл. 3). Аэродинамическое моделирование позволило выявить площадки с возможным сроком окупаемости уже в 9 лет.

Таблица 3 – Результаты технико-экономического расчёта площадок

Год	Площадка №1		Площадка № 2		Площадка № 3		Площадка № 4	
	ЧДД	$V_{ср}$	ЧДД	$V_{ср}$	ЧДД	$V_{ср}$	ЧДД	$V_{ср}$
	тыс. руб.	м/с	тыс. руб.	м/с	тыс. руб.	м/с	тыс. руб.	м/с
2015	-15187,8	4,57	-15683,1	4,34	-15925,9	3,75	-17015,9	2,35
2016	-13829,8	4,47	-14838,7	4,26	-15345,5	3,64	-17523,8	2,3
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2024	1821,0	4,99	-3910,1	4,87	-6906,0	4,15	-20453,8	2,61
2026	7554,3	4,47	90,3	4,26	-3775,8	3,64	-21064,0	2,3
2029	16363,8	5,01	6352,6	4,78	1209,9	4,13	-21673,1	2,52
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2034	39157,4	4,99	23584,1	4,87	15443,6	4,15	-21367,8	2,61

Далее проведён многокритериальный выбор площадок для размещения ВЭС с использованием предложенной автором методики на основе методов MAUT и SMART (рис. 4). В исследовании учитывались такие критерии как: f_1 – максимизация экономической эффективности работы ВЭС, выраженной в ЧДД; f_2 – максимизация удобства обслуживания и монтажа, выраженной в оценках искусственной шкалы, отражающей расположение до центра электрических нагрузок, наличие транспортных подходов, кустарников и деревьев, тип местности, качество грунта и фундамента; f_3 – минимизация воздействия на окружающую среду, которая выражается через ценность: почв, отводимых под площадку, биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения, лесных пород и кустарников. Несмотря на наиболее высокие результаты по ЧДД на площадке №1, при многокритериальной оценке наиболее перспективным для размещения ВЭС является площадка №3 ввиду лучших оценок по удобству обслуживания и монтажа и невысокого воздействия на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 большого числа критериев.

3. Усовершенствована методика многокритериального выбора районов и площадок размещения ВЭС для учета неопределённости предпочтений ЛПР. Методика позволяет проводить анализ влияния отклонений оценок ЛПР на результаты, выявлять устойчивые к изменениям предпочтений ЛПР альтернативы, которые следует рассматривать как наиболее перспективные для дальнейших исследований.

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».

6. 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 критериев.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК

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

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

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

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

5. Емцев, А.Н. Анализ эффективности использования ветроэнергетических установок в северных районах республики Саха (Якутия) / А.Н. Емцев, В.А. Шакиров, А.Ю. Артемьев// Системы. Методы. Технологии. – 2011. -№2 (10). – с. 98-101.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство №2014619044. Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind-MCA v. 1.00) / Шакиров В. А., Артемьев А. Ю.// Заявка №2014617746. Дата о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619044 от 08 сентября 2014.

Статьи и материалы конференций

7. Артемьев, А.Ю. Методика принятия решений при выборе районов для размещения ВЭС с учётом неопределённости в отношении критериальных оценок. Системные исследования в энергетике. Труды молодых учёных ИСЭМ СО РАН /А.Ю. Артемьев // Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – С.98-104.

8. Артемьев, А.Ю. Поддержка принятия решений по выбору районов размещения ветроэнергетических установок. Математическое моделирование и информационные технологии /А.Ю. Артемьев// Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: Материалы конференции. В 6 т. Т. 5 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2016. – 176 с.

9. Артемьев, А.Ю. Информационные технологии в решении задачи оценки ветроэнергетического потенциала района посёлка Аян Хабаровского края /А.Ю. Артемьев // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы: тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Хабаровск, Изд-во ДВГУПС, 2015. С. 205-208.

10. Артемьев, А.Ю. Поддержка принятия решений при выборе района для размещения ВЭС /А.Ю. Артемьев, В.А. Шакиров// Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 2. № 2. С. 83-88.

11. Артемьев, А.Ю. Поддержка принятия решений при размещении генерирующих мощностей в удаленных районах /А.Ю. Артемьев, В.В. Кайро // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. Т1. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – С. 80-85.

12. Артемьев, А.Ю. Исследование эффективности использования ветровых и солнечных энергетических установок /А.Ю. Артемьев // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. Т1. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. С.31-36.

13. Артемьев, А.Ю. Поддержка принятия решений при анализе проектов использования ветроэнергетических установок /А.Ю. Артемьев // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 107-110.

14. Артемьев, А.Ю. Учёт рельефа местности при выборе площадок размещения ветроэнергетических установок /А.Ю. Артемьев// Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 110-114.