

Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций

А.Ю. Артемьев^a, В.А. Шакиров^b, Т.Н. Яковкина^c

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^aartuniverse@mail.ru, ^bmynovember@mail.ru, ^cjatano@yandex.ru

Статья поступила 2.07.2016, принята 16.08.2016

Приводятся перспективы развития ветровой энергетики в России. Формулируется задача выбора наиболее перспективных районов для размещения ветровых электрических станций. Предлагается методика многокритериальной оценки районов размещения ветровых электрических станций на основе метода многокритериальной теории полезности. Рассматриваются особенности применения метода многокритериальной теории полезности в отношении проверки условий независимости. Рассматриваются основные этапы метода, такие как построение однокритериальных функций ценности, определение шкалирующих коэффициентов. Для возможности использования метода МАУТ в условиях большого числа критериев предложена дополнительная процедура оценивания комплексных критериев методом группы SMART. Для апробации предлагаемой методики рассматриваются северные районы Республики Саха (Якутия). Формируется иерархия из четырех критериев. Экономическая эффективность района для размещения ветровой электрической станции оценивается чистым дисконтированным доходом проекта за рассматриваемый период. Вторым критерием является коэффициент вариации, он отражает стабильность ветрового потока за рассматриваемый период. Третий критерий отражает социальный эффект. Критерий включает два субкритерия: динамику численности населения и наличие перспективных инвестиционных проектов. Четвертым критерием является экологическая эффективность проекта, которая зависит от близости природоохранных территорий. В результате реализации методики получены многокритериальные оценки районов. Приведено сопоставление результатов многокритериальной оценки и оценки только по одному критерию экономической эффективности. На последнем этапе многокритериального сравнения районов проводится анализ чувствительности результатов к изменениям оценок альтернатив и к изменениям структуры предпочтений лица, принимающего решения. Анализ чувствительности позволяет окончательно сформировать группу районов, наиболее предпочтительных для размещения ветровых электрических станций.

Ключевые слова: многокритериальный анализ; теория полезности; ветровые электрические станции; размещение.

Criteria-based choice of areas for siting the wind power plants

A.Yu. Artemyev^a, V.A. Shakirov^b, T.N. Yakovkina^c

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^aartuniverse@mail.ru, ^bmynovember@mail.ru, ^cjatano@yandex.ru

Received 2.07.2016, accepted 16.08.2016

The prospects have been presented for the development of wind power engineering in Russia. The problem of choosing the most prospective areas for siting the wind power plants has been formulated. Criteria-based technique has been proposed to estimate the areas for siting the wind power plants. The technique is based on the method of the criteria-based utility theory. The peculiarities in application of the method of the criteria-based utility theory for verification of the independence conditions have been considered. The basic steps of the method have been studied, such as the construction of one-criterion value functions and determination of scaled coefficients. To be able to use the method of the criteria-based utility theory in a large number of criteria, the procedure has been proposed for complex criteria estimation by the method of SMART group. To test the technique proposed, the northern areas of the Republic of Sakha (Yakutia) have been considered. The four-criterion hierarchy has been formed. The first one is the economic efficiency of the areas, suitable for siting a wind power plant, which has been estimated by net present value of the project income for the period under review. The second criterion is variation coefficient. It reflects the stability of the wind flow over the period under review. The third criterion reflects the social impact. It comprises two sub-criteria: population dynamics and the availability of promising investment projects. The fourth criterion is the project environmental efficiency, which depends on the proximity of nature conservation areas. As a result of technique implementation, criteria-based estimates for areas have obtained. The comparison has been made for the results of the criteria-based estimate and one-criterion estimate of the economic efficiency. At the final step of the criteria-based comparison of the areas, the sensitivity analysis has been done for the results to the changes in estimating the alternatives and to the changes in the structure of the decision maker's preferences. The sensitivity analysis allows to finalize the formation of the group of areas, which are the most preferred for siting the wind power plants.

Key words: criteria-based analysis; utility theory; wind power plants; siting.

Введение

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 г. [1] и Схеме территориального планирования Российской Федерации в области энергетики [2]

намечено строительство ветровых электростанций (ВЭС) мощностью более 6 060 МВт. Проблема размещения электростанций — системная, для нее характерны такие усложняющие факторы, как многокритери-

альность, слабая структурированность, неопределенность, неоднозначность [3]. Для учета множества критериев с количественным и качественным описанием при оценке альтернатив разработаны методы принятия решений [4; 5]. В их основе лежит выявление предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), относительно критериев и построение на этой основе модели оценки альтернатив. В статье предлагается методика многокритериальной оценки районов размещения ВЭС на основе метода MAUT (Multi-attribute utility theory). Проводится апробация методики на северных районах Республики Саха (Якутия).

Методика многокритериального выбора районов на основе метода MAUT. Метод MAUT был выбран для решения задачи оценки районов для размещения ВЭС, так как имеет следующие преимущества [3–5]:

- аксиоматическое обоснование;
- применимость в условиях неопределенности или нечеткой исходной информации [6; 7];
- детальная проработка диалоговых процедур;
- широчайшая апробация на задачах принятия решений в области энергетики [8–12];
- возможность проведения анализа большого количества альтернатив;
- возможность не только ранжирования, но и количественной оценки районов для выявления степени их превосходства;
- возможность оценки вновь вводимых альтернатив при условии, что их критериальные оценки не выходят за диапазон изменения оценок уже рассмотренных альтернатив.

На рис. 1 представлена предлагаемая методика многокритериального выбора района на основе метода MAUT.

| | |
|----|--|
| 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 субкритериев $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ip}\}$ |
| 4 | Проверка условий независимости MAUT |
| 5 | Сравнение альтернатив по субкритериям |
| 6 | Построение однокритериальных функций полезности $u_i(y_i)$ или ценности $v_i(y_i)$ |
| 7 | Оценка шкалирующих коэффициентов |
| 8 | Многокритериальная оценка альтернатив |
| 9 | Анализ чувствительности альтернатив |
| 10 | Ранжирование районов |

Рис. 1. Методика многокритериальной оценки районов размещения ВЭС на основе метода MAUT

Рассмотрим основные идеи метода MAUT. Метод имеет аксиоматическое обоснование, поэтому при выполнении для ЛПР некоторых условий-аксиом можно получить многокритериальную функцию полезности. С ее помощью можно оценить альтернативы с одновременным учетом всех критериев. Доказательство существования такой функции вытекает из выполнения условий-аксиом. Условия-аксиомы можно разделить на две группы. В первую группу входят следующие аксиомы: архимедова, связности, транзитивности, растворимости. Их выполнение позволяет заключить, что система предпочтений ЛПР, заданная на языке бинарных отношений, может быть сведена к задаче однокритериальной скалярной оптимизации [5]. Во вторую группу входят условия независимости критериев, выполнение которых позволяет определить свойства функции полезности, например аддитивность [5].

Так, при выполнении условий взаимной независимости по полезности можно получить многокритериальную функцию полезности $u(y)$ в аддитивном (1) или мультипликативном (2) виде [13]:

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

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

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

Если рассматривается выбор в условиях определенности, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$ [5; 13]. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению позволяет получить многокритериальную функцию ценности в аддитивном виде [5; 13]:

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

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

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 или воспользоваться каким-либо из способов компенсации, позволяющим уравновесить полезности вариантов по частным критериям [13].

После определения вида функции необходимо выполнить процедуры построения однокритериальных функций ценности $u_i(y_i)$, оценки значений шкалирующих коэффициентов k в соответствии с (1), (2) или (3).

Построение функции ценности проводится на основе опроса ЛПР, в ходе которого нескольким оценкам по критерию устанавливается ценность для ЛПР в диапазоне от 0 до 1 (рис. 2). Лучшая достижимая оценка по критерию y^1 имеет ценность $v_i(y^1) = 1$, худшая оценка y^0 имеет ценность $v_i(y^0) = 0$.

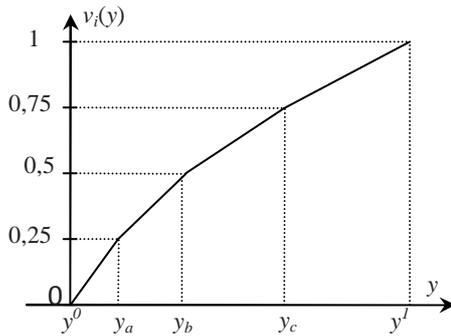


Рис. 2. Пример однокритериальной функции ценности

Для оценки шкалирующих коэффициентов могут применяться различные подходы [14–16]. Например, критерии могут попарно сопоставляться с целью поиска равноценных альтернатив. Рассмотрим один этап этой процедуры на примере одной пары из n критериев f_i и f_j . Искусственно формируются альтернативы: A1 с лучшей оценкой y_i^1 по критерию f_i и худшей y_j^0 по f_j , A2 с худшей оценкой y_i^0 по критерию f_i и лучшей y_j^1 по f_j (рис. 3).

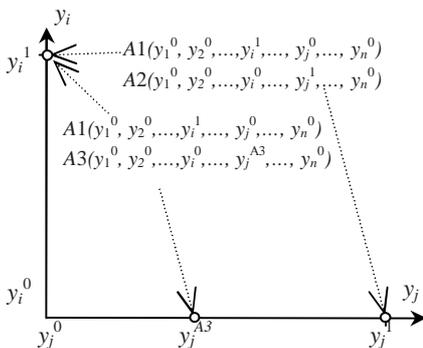


Рис. 3. Сопоставление критериев для оценки шкалирующих коэффициентов

Оценки альтернатив A1, A2 по остальным критериям $y_1^0, y_2^0, \dots, y_n^0$ фиксируются на худшем уровне, что позволяет исключить их из анализа, поскольку полезность (ценность) худших оценок равна 0. Такое действие не оказывает влияния на оценку шкалирующих коэффициентов критериев, так как проверено выполнение условия независимости по предпочтению (этап 4, рис. 1). ЛПР предлагается определить лучшую альтернативу из предложенных. При выборе, например, A2 для ЛПР формируется второй вопрос. Необходимо определить альтернативу A3 с худшей оценкой по f_i , такую, что она будет равноценна проигравшей альтернативе A1. Полученные равноценные альтернативы имеют равную многокритериальную ценность:

$$v(y^{A1}) = v(y^{A3})$$

$$k_1 v_1(y_1^0) + \dots + k_i v_i(y_i^1) + \dots + k_j v_j(y_j^0) + \dots + k_n v_n(y_n^0) = k_1 v_1(y_1^0) + \dots + k_i v_i(y_i^0) + \dots + k_j v_j(y_j^{A3}) + \dots + k_n v_n(y_n^0)$$

$$k_i = k_j v_j(y_j^{A3})$$

С учетом условия, что сумма шкалирующих коэффициентов равна 1, достаточно провести сопоставление $n-1$ пар критериев. В результате может быть сформирована система линейных уравнений и определены все шкалирующие коэффициенты.

Итак, после определения вида функции полезности (ценности), ее шкалирующих коэффициентов и однокритериальных функций может быть дана оценка всем районам (этап 8, рис. 1).

Перейдем к рассмотрению особенностей этапа 5 (рис. 1). Область эффективного применения метода MAUT ограничивается количеством критериев в связи с возрастающими трудозатратами на выполнение проверок независимости. Так, согласно [5] максимальное количество критериев, исходя из этих соображений, составляет 7. В этой связи при использовании метода формируются комплексные критерии, включающие в свой состав несколько влияющих параметров или субкритериев. Например, при оценке экологических воздействий могут применяться субкритерии для оценки воздействий на водоемы, почву, атмосферу. Для применения MAUT необходимо каждую альтернативу оценить по субкритериям и выразить ее ценность по комплексному критерию. Для реализации этой локальной процедуры предлагается использовать намного более легкий и удобный по сравнению с MAUT эвристический метод группы SMART (the Simple Multi Attribute Rating Technique) [17–20]. Идея метода заключается в вычислении общей ценности $u(A_i)$ каждой альтернативы A_i как взвешенной суммы частных ценностей:

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

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

Определение $u_q(A_i)$ проводится в ходе прямого опроса ЛПР. В модифицированном варианте метода [19] — SMARTER для оценки альтернатив используются функции ценности по аналогии с MAUT (рис. 2).

Веса субкритериев определяются по выражению:

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

где b_q — значимость субкритерия s_q в баллах.

Метод SMART дает целостную оценку вариантам, надежен при практическом использовании [18; 19]. Его применение на этапе 5 позволяет реализовать многокритериальное сравнение альтернатив методом MAUT в ситуации с большим числом критериев, которые были агрегированы в комплексные.

Перейдем к рассмотрению этапа 9 (рис. 1). Анализ чувствительности — это исследование изменчивости ранжирования альтернатив, полученного по выражениям (1), (2) или (3), при варьировании в небольших пределах исходных данных, однокритериальных функций полезности (ценности), шкалирующих коэффициентов [4; 13]. Если некоторые альтернативы сильно реагиру-

ют на небольшие изменения вышеуказанных параметров и значительно меняют свой порядок в ранжировании, то они признаются неустойчивыми, и при окончательном решении о выборе района им следует отдавать меньшее предпочтение. Напротив, следует считать перспективной альтернативу с высокой, хоть и не самой лучшей многокритериальной оценкой, если эта оценка не подвержена значимым изменениям, т. е. ранжирование альтернативы не меняется.

Анализ чувствительности позволяет выявить оценки экспертов и ценностные установки, которые могут существенно влиять на результаты анализа, перспективные и неперспективные для дальнейшего рассмотрения альтернативы [4; 13].

Итак, рассмотрены основные этапы методики многокритериальной оценки районов, которая позволяет провести анализ наиболее перспективных альтернатив с помощью метода MAUT, дополненного методом группы SMART для условий большого числа критериев.

Апробация методики многокритериального выбора районов для размещения ВЭС. Для апробации методики были выбраны северные территории Республики Саха (Якутия), находящиеся вне зоны централизованного электроснабжения. Энергоснабжение многочисленных мелких потребителей осуществляется с помощью дизельных электростанций. Современная ситуация характеризуется высокой степенью износа энергетического оборудования, ограниченным использованием местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе нетрадиционных, высокой сложностью и стоимостью завоза дизельного топлива [3].

Высокий ветроэнергетический потенциал севера Республики Саха (Якутия) позволяет поставить задачу оценки эффективности использования энергии ветра, выбора наиболее перспективных районов для размещения ВЭС.

В соответствии с первыми этапами методики (рис. 1) была сформирована главная цель: определение районов, где размещение ВЭС будет наиболее эффективно. Для достижения главной цели необходимо обеспечить выполнение целей нижнего уровня иерархии:

- 1) наибольший экономический эффект проекта ВЭС;
- 2) наибольший социальный эффект проекта ВЭС;
- 3) наибольший экологический эффект проекта ВЭС.

Альтернативами для выбора будут являться районы в окрестностях населенных пунктов Тикси, Усть-Оленек, Быков Мыс, Таймылыр, Найба, Юрунг-Хая, Саскылах, Хайыр, Чокурдах, Кюсюр.

Для исследуемых районов были сформированы критерии $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ и субкритерии $S_3 = \{s_{31}, s_{32}\}$.

Критерии для оценки степени достижения первой цели: f_1 , чистый дисконтированный доход за 20 лет работы ВЭС — в качестве критерия, отражающего экономическую эффективность;

f_2 , коэффициент вариации скорости ветра за период 20 лет — в качестве критерия, отражающего стабильность ветрового потока, и, следовательно, экономическую стабильность проекта.

Критерием для оценки степени достижения второй цели служит f_3 , отражающий перспективу развития района. Он включает два субкритерия:

s_1 — динамика численности населения;

s_2 — наличие инвестиционных проектов в районе строительства ВЭС.

Критерием для оценки степени достижения цели экологической эффективности служит f_4 — близость природоохранных территорий. Замещение энергоисточников на традиционных видах топлива снизит экологическую нагрузку в районе.

Критерии были проверены на независимость по предпочтению, что позволило сделать вывод о возможности получения многокритериальной функции ценности вида (3).

На пятом этапе (рис. 1) проведено сравнение альтернатив по субкритериям s_1 и s_2 методом SMARTER. Для оценки альтернатив по субкритерию s_1 использовались данные переписи населения в пунктах. Применялась линейная однокритериальная функция ценности для перевода оценок (табл. 1).

Таблица 1

Оценка альтернатив по субкритерию s_1

| Пункт | Численность постоянного населения, чел. | | 2010 г. в % к 2002 г. | Оценка ценности $u_q(A_i)$ |
|-------------|---|---------|-----------------------|----------------------------|
| | 2010 г. | 2002 г. | | |
| Тикси | 5 055 | 5 873 | 86,07 | 0,38 |
| Усть-Оленек | 27 | 52 | 51,92 | 0,000 |
| Быков Мыс | 517 | 363 | 142,42 | 1,000 |
| Таймылыр | 757 | 900 | 84,11 | 0,36 |
| Найба | 522 | 500 | 104,40 | 0,58 |
| Юрунг-Хая | 1 148 | 1 051 | 109,23 | 0,63 |
| Саскылах | 2 317 | 1 985 | 116,73 | 0,72 |
| Хайыр | 433 | 441 | 98,20 | 0,51 |
| Чокурдах | 2 367 | 2 591 | 91,35 | 0,44 |
| Кюсюр | 1 345 | 1 336 | 100,67 | 0,54 |

Для оценки альтернатив по субкритерию s_2 проводился поиск информации об инвестиционных проектах в документах, постановлениях, стратегиях развития районов Республики Саха (Якутия). Результаты анализа представлены в табл. 2. На основе опроса ЛПР была построена однокритериальная функция ценности нелинейного вида.

На основе опроса ЛПР была определена значимость субкритериев в баллах: $b_1 = 4$, $b_2 = 6$. На основании (5) были определены веса субкритериев — 0,4 и 0,6 соответственно.

Используя (4), была определена общая ценность альтернатив по комплексному критерию f_3 . С учетом нормализации оценки представлены в табл. 3.

На шестом этапе (рис. 1) проводится построение однокритериальных функций ценности для критериев f_1, f_2, f_3, f_4 . Однокритериальные функции ценности критериев f_3, f_4 линейны. На рис. 4 и 5 представлены однокритериальные функции ценности критериев f_1, f_2 .

Таблица 2

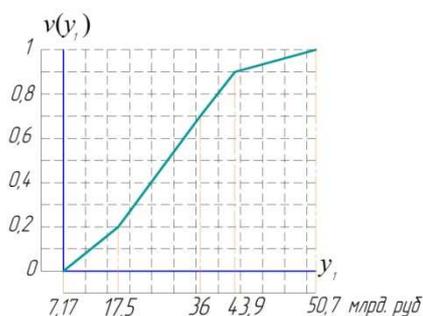
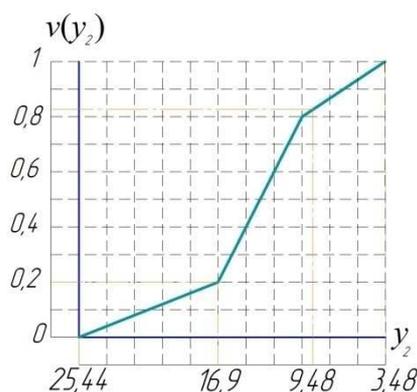
Оценка альтернатив по субкритерию s_2

| Пункт | Объекты строительства | Вложения, млн р. | Оценка ценности $u_q(A_i)$ |
|-------------|--|------------------|----------------------------|
| Тикси | 1. Развитие морских портов | 25 260,14 | 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 | 15 015 | 0,85 |
| | 2. ПАТЭС 35 МВт | | |
| Саскылах | нет | 0 | 0,00 |
| Хайыр | 1. Строительство школы | 131 | 0,35 |
| | 2. Строительство котельной | | |
| Чокурдах | Развитие оленеводства | 6,621 | 0,14 |
| Кюсюр | Рыбзавод | 6,476 | 0,13 |

Таблица 3

Результаты оценки альтернатив по комплексному критерию f_3 методом SMARTER

| Пункт | Общая ценность $u(A_i)$ | Нормализованная ценность |
|-------------|-------------------------|--------------------------|
| Тикси | 0,751 | 0,984 |
| Усть-Оленек | 0,000 | 0,000 |
| Быков Мыс | 0,400 | 0,524 |
| Таймылыр | 0,142 | 0,186 |
| Найба | 0,232 | 0,304 |
| Юрунг-Хая | 0,763 | 1,000 |
| Саскылах | 0,286 | 0,375 |
| Хайыр | 0,414 | 0,543 |
| Чокурдах | 0,260 | 0,338 |
| Кюсюр | 0,294 | 0,384 |

Рис. 4. Однокритериальная функция ценности для критерия f_1 — чистый дисконтированный доходРис. 5. Однокритериальная функция ценности для критерия f_2 — коэффициент вариации скорости ветра

При оценке альтернатив по критерию f_4 — близость рекреационных природоохранных территорий на основании географических карт — были произведены замеры расстояний от пунктов до трех 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. Результаты оценки альтернатив представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка альтернатив по критерию k_3

| Пункт | Природоохранная территория | Расстояние, км | Оценка ценности |
|-------------|---|----------------|-----------------|
| Тикси | Ресурсный резерват «Лена-Дельта» | 50 | 0,350 |
| Усть-Оленек | Ресурсный резерват «Терпей-Тумус» | 59 | 0,193 |
| | Ресурсный резерват «Бур» | 92 | |
| Быков Мыс | Ресурсный резерват «Лена-Дельта» | 8 | 0,950 |
| Таймылыр | Ресурсный резерват «Бур» | 45,5 | 0,680 |
| | Ресурсный резерват «Лена-Дельта» | 68 | |
| Найба | Заказник «Янские Мамонты» | 44 | 0,500 |
| Юрунг-Хая | Ресурсный резерват «Терпей-Тумус» | 56 | 0,200 |
| Саскылах | Ресурсный резерват «Бур» | 80 | 0,000 |
| Хайыр | Заказник «Янские Мамонты» | 0 | 1,000 |
| Чокурдах | Ресурсный резерват «Суннагино – Силиглинский» | 14 | 0,912 |
| Кюсюр | Ресурсный резерват «Лена-Дельта» | 51 | 0,324 |

Следующим шагом было определение шкалирующих коэффициентов (рис. 6).

Таблица 5

Многокритериальные оценки пунктов

| Пункт | Оценки альтернатив по критериям | | | | Оценка |
|-------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | |
| Тикси | 1,000 | 0,820 | 0,984 | 0,350 | 0,866 |
| Усть-Оленек | 0,900 | 0,817 | 0,000 | 0,193 | 0,702 |
| Быков Мыс | 0,862 | 0,820 | 0,524 | 0,950 | 0,849 |
| Таймылыр | 0,700 | 0,817 | 0,186 | 0,680 | 0,671 |
| Найба | 0,651 | 0,820 | 0,304 | 0,500 | 0,616 |
| Юрунг-Хая | 0,464 | 0,680 | 1,000 | 0,200 | 0,477 |
| Саскылах | 0,200 | 0,950 | 0,375 | 0,000 | 0,251 |
| Хайыр | 0,120 | 0,560 | 0,543 | 1,000 | 0,349 |
| Чокурдах | 0,090 | 0,000 | 0,338 | 0,912 | 0,244 |
| Кюсюр | 0,000 | 0,000 | 0,384 | 0,324 | 0,085 |

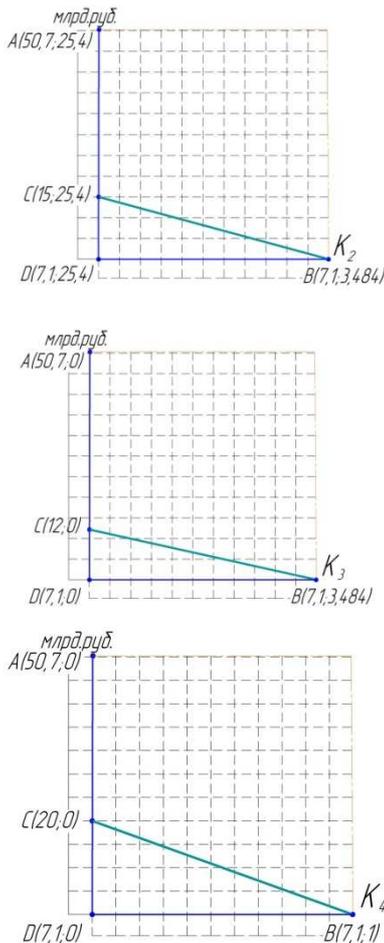


Рис. 6. Сопоставление пар критериев

По выявленным равноценным альтернативам была составлена система линейных уравнений:

$$\begin{cases} 0,15k_1 = k_2 \\ 0,11k_1 = k_3 \\ 0,27k_1 = k_4 \\ k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1 \end{cases}$$

Из решения системы линейных уравнений были получены: $k_1 = 0,654$, $k_2 = 0,098$, $k_3 = 0,072$, $k_4 = 0,176$.

Подставляя в (3) значения коэффициентов и оценок альтернатив по каждому критерию, получаем их многокритериальные оценки (табл. 5).

В табл. 5 пункты ранжированы по критерию f_1 — чистый дисконтированный доход, который принимается в большинстве исследований как приоритетный показатель. Можно отметить, что ранжирование районов по многокритериальной оценке отличается. Например, пункт Быков Мыс находится на втором месте по многокритериальной оценке, так как имеет намного лучшие оценки по экологическому и социальному критериям в сравнении с Усть-Оленек. Благодаря высокой оценке по экологическому критерию и средней — по социальному, пункт Хайыр поднялся выше пункта Саскылах.

Таким образом, несмотря на высокую ценность экономического критерия, ранжирование районов изменяется при многокритериальной оценке.

Завершающим этапом проводился анализ чувствительности. Были изменены оценки по критерию f_1 , имеющему наибольший вес. Понизив оценку по f_1 с 1,0 до 0,97, п. Тикси изменил позицию с первого на второе место. Так же существенно повлияло незначительное понижение оценки по f_1 на многокритериальную оценку пункта Усть-Оленек. Быков Мыс, Найба, Хайыр оказались наиболее стабильными альтернативами ввиду средних и высоких оценок по остальным критериям.

Далее была проведена проверка чувствительности альтернатив к изменению шкалирующих коэффициентов. Были приняты следующие значения шкалирующих коэффициентов: $k_1 = 0,599$, $k_2 = 0,060$, $k_3 = 0,150$, $k_4 = 0,192$. Результаты расчета многокритериальной оценки для пунктов с новыми условиями представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты анализа чувствительности

| Пункт | Многокритериальная оценка при шкалирующих коэффициентах $k_1 = 0,599$, $k_2 = 0,060$, $k_3 = 0,150$, $k_4 = 0,192$ |
|-------------|---|
| Тикси | 0,862 |
| Усть-Оленек | 0,607 |
| Быков Мыс | 0,826 |
| Таймылыр | 0,626 |
| Найба | 0,580 |
| Юрунг-Хая | 0,507 |
| Саскылах | 0,233 |
| Хайыр | 0,378 |
| Чокурдах | 0,279 |
| Кюсюр | 0,120 |

По результатам анализа чувствительности можно сделать вывод, что при изменении шкалирующих коэффициентов большинство альтернатив сохраняет позиции в ранжировании, за исключением пунктов Усть-Оленек и Саскылах. Тикси и Быков Мыс сохранили устойчивые лидирующие позиции, что позволяет выделить эти альтернативы как наиболее перспективные.

Выводы

Проведенный многокритериальный анализ районов позволил определить наиболее перспективные альтернативы с позиции четырех критериев.

Предложенная методика многокритериальной оценки позволяет учесть социальные и экологические аспекты в задаче ввода ветроэнергетических мощностей. Это позволяет повысить обоснованность принимаемых решений.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Прил. к обществ.-дел. журн. Энергетическая политика. 2010. Вып. 1. С. 181-184.
2. Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 11 нояб. 2013 г. № 2084-р. URL: <http://government.ru/media/files/41d4a33bd567e72145d3.pdf> (дата обращения: 18.05.2016).
3. Шакиров В.А. Многокритериальный анализ перспективного размещения ветроэнергетических установок на севере республики Саха (Якутия) // Вестн. Северо-Вост. Федер. ун-та им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10, № 1. С. 26-33.
4. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
5. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
6. Merkur'yeva G.V., Borisov A.N. Decomposition of multiattribute fuzzy utility functions // Fuzzy Sets and Systems. 1987. Vol. 24, № 1. P. 35-50.
7. Борисов А.И., Алексеев А.В. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 124 с.
8. 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.
9. Hobbs B.F. A Comparison of Weighting Methods in Power Plant Siting. Decision Science, 1980, Vol. 11, № 4. P. 725-723.
10. Hwang W.T. Application of Multi-Attribute Utility Analysis for the Decision Support of Countermeasures in Early Phase of a Nuclear Emergency // Journ. of Korean Association Radiation Protection. 2004. Vol. 29, № 1. P. 65-71.
11. McDaniels T.L. A Multiattribute Index for Evaluating Environmental Impacts of Electric Utilities // Journ. of Environmental Management. 1996. Vol. 46. P. 57-66.
12. Keeney R.L., Lathrop J.F. Sichertman A. An Analysis of Baltimore Gas and Electric Company's Technology Choice. Operation Research. 1986. Vol. 34. № 1. P. 18-39.
13. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs, Cambridge University Press, Cambridge & New York, 1993. 569 p.
14. Шакиров В.А. Принятие решений в условиях нечетких предпочтений на основе многокритериальной теории ценности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 48-55.
15. Belton V., Stewart T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 343 p.
16. Яцало Б.И., Грицок С.В., Мирзеабасов О.А., Василевская М.В. Учет неопределенностей в рамках многокритериального анализа решений с использованием концепции приемлемости // Управление большими системами: сб. тр. 2011. № 32. С. 5-30.
17. Winterfeldt D., Edwards W. Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 604 p.
18. Shepetukha, Y., Olson, D.L.: Comparative Analysis of Multi-attribute Techniques Based on Cardinal and Ordinal Inputs. Mathematical and Computer Modelling, 2001, Vol. 34, pp. 229-241.

19. Schramm F., Morais D.C. Decision support model for selecting and evaluating suppliers in the construction industry // Pesquisa Operacional, 2012, Vol.32, No.3, pp. 643-662.

20. Edwards W., Barron F.H. SMARTS and SMARER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. Organizational Behavior & Human Decision Processes, 1994. Vol. 60. P. 306-325.

References

1. Energy Strategy of Russia for the period till 2030 // Pril. k obshchestv.-del. zhurn. Energeticheskaya politika. 2010. Vyp. 1. P. 181-184.
2. Territorial planning scheme of the Russian Federation in the field of energy [Elektronnyi resurs]: rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 11 noyab. 2013 g. № 2084-r. URL: <http://government.ru/media/files/41d4a33bd567e72145d3.pdf> (data obrashcheniya: 18.05.2016).
3. Shakirov V.A. Multi-criteria analysis of wind turbines advanced placement in the North of The Republic of Sakha (Yakutia) // Herald of the NEFU named after M.K. Ammosov. 2013. T. 10, № 1. P. 26-33.
4. Kini R. Siting energy facilities: per. s angl. M.: Energoatomizdat, 1983. 320 p.
5. Chernorutskii I.G. Decision-making methods. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 416 p.
6. Merkur'yeva G.V., Borisov A.N. Decomposition of multiattribute fuzzy utility functions // Fuzzy Sets and Systems. 1987. Vol. 24, № 1. P. 35-50.
7. Borisov A.I., Alekseev A.V. Fuzzy Information Processing in the decision-making systems. M.: Radio i svyaz', 1989. 124 p.
8. 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.
9. Hobbs B.F. A Comparison of Weighting Methods in Power Plant Siting. Decision Science, 1980, Vol. 11, № 4. P. 725-723.
10. Hwang W.T. Application of Multi-Attribute Utility Analysis for the Decision Support of Countermeasures in Early Phase of a Nuclear Emergency // Journ. of Korean Association Radiation Protection. 2004. Vol. 29, № 1. P. 65-71.
11. McDaniels T.L. A Multi-attribute Index for Evaluating Environmental Impacts of Electric Utilities // Journ. of Environmental Management. 1996. Vol. 46. P. 57-66.
12. Keeney R.L., Lathrop J.F. Sichertman A. An Analysis of Baltimore Gas and Electric Company's Technology Choice. Operation Research. 1986. Vol. 34. № 1. P. 18-39.
13. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs, Cambridge University Press, Cambridge & New York, 1993. 569 p.
14. Shakirov V.A. Decision making under fuzzy preferences based on multi-attribute value theory // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 3. P. 48-55.
15. Belton V., Stewart T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 343 p.
16. Yatsalo B.I., Gritsyuk S.V., Mirzeabasov O.A., Vasilevskaya M.V. Uncertainty treatment within multicriteria decision analysis with the use of acceptability concept // Upravlenie bol'shimi sistemami: sb. tr. 2011. № 32. P. 5-30.
17. Winterfeldt D., Edwards W. Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 604 p.
18. Shepetukha, Y., Olson, D.L.: Comparative Analysis of Multi-attribute Techniques Based on Cardinal and Ordinal Inputs. Mathematical and Computer Modelling, 2001, Vol. 34, pp. 229-241.
19. Schramm F., Morais D.C. Decision support model for selecting and evaluating suppliers in the construction industry // Pesquisa Operacional, 2012, Vol.32, No.3, pp. 643-662.
20. Edwards W., Barron F.H. SMARTS and SMARER: Improved simple methods for multi-attribute utility measurement. Organizational Behavior & Human Decision Processes, 1994. Vol. 60. P. 306-325.