

Методика многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций

Аннотация. В статье рассматривается задача принятия решений по размещению электростанций. Один из этапов задачи – выбор пункта размещения, наиболее сложен в виду таких факторов как многокритериальность, высокая степень неопределенности информации, слабая структурированность. Особенно усложняет выбор пункта размещения необходимость предварительного принятия ряда решений, таких как выбор площадки и мощности станции. Для определения лучшего пункта размещения электростанции формулируется многокритериальная задача с выделением двух уровней альтернатив – пунктов размещения и вариантов реализации электростанции. В виду того, что условия анализа альтернатив двух уровней отличаются, предложено применить два метода многокритериального анализа. Предложена методика двухуровневого многокритериального анализа альтернатив с использованием метода многокритериальной теории полезности и метода анализа иерархий. Предложена методика анализа альтернатив с учетом размытых в отношении критериев предпочтений лица, принимающего решения. Приводится пример выбора пункта размещения гидроэлектростанции.

Ключевые слова: многокритериальный двухуровневый анализ, многокритериальная теория полезности, метод анализа иерархий, размещение гидроэлектростанции.

Введение

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года и Схеме территориального планирования Российской Федерации в области электроэнергетики, в ближайшие годы планируется значительный объем строительства электростанций.

Размещение электростанций – сложная комплексная проблема, которую можно отнести к системным в связи с наличием таких признаков как многокритериальность, слабоструктурированность и неопределенность исходной информации. При размещении электростанции необходим учет экономических факторов, факторов окружающей среды, социально-экономических факторов, факторов здоровья и безопасности населения, общественного мнения [1]. Принятие решений по таким проблемам не может строиться исключительно на «объективной» основе, так как многочисленность и противоречивость преследуемых при размещении целей требует рассмотрения субъективных ценностей лица, принимающего решения (ЛПР), и их воз-

можной взаимной компенсации [2]. В качестве ЛПР может выступать представитель или группа представителей энергетических, промышленных и инвестиционных компаний, администраций регионов.

В процессе принятия решений по размещению электростанций можно выделить два этапа: выбор пункта размещения, выбор площадки размещения электростанции [3]. Пункт – территория, на которой могут быть размещены одна или несколько площадок в пределах района [3]. Площадка – территория, в пределах охраняемого периметра, на которой размещаются все основные и вспомогательные сооружения станции и территория за пределами ограды, на которой размещаются открытые распределительные устройства, внешние гидросооружения и т.д. [3].

Этап выбора пункта является наиболее сложным для анализа в связи со следующими факторами.

1) Для возможности сравнения пунктов, в каждом из них должны быть предварительно намечены площадки и варианты мощности электростанции, которые наиболее вероятно могут быть в дальнейшем реализованы [3].

Поэтому можно выделить два уровня анализа [4-6]. Альтернативами первого уровня являются пункты, альтернативами второго уровня – предварительные решения: варианты площадок, мощности электростанции. От качества анализа на втором уровне во многом зависит результат сравнения пунктов размещения на первом уровне анализа.

2) Необходимость учета многих критериев на двух уровнях анализа. В нормативных документах по проектированию электростанций отмечается необходимость учета воздействий объекта на окружающую среду, здоровье и безопасность человека, социальные воздействия, однако отсутствуют методические рекомендации по многокритериальному сравнению альтернатив. Как правило, учет многих факторов проводится таким образом, что экономическая эффективность является определяющей, а экологические, социальные и другие факторы учитываются только в роли ограничений. Однако в настоящее время при проектировании электростанций все более важную роль играет мнение общественных и природоохранных организаций. Существуют примеры, когда недостаточное внимание к требованиям указанных организаций приводило к остановке строительства, изменениям в проекте электростанции.

При двухуровневом многокритериальном анализе требуется учет многих факторов как при выборе пунктов, так и при предварительном выборе площадок и вариантов мощности, что существенно повышает размерность задачи.

3) Наиболее высокий уровень неопределенности информации, так как выбор пункта является одним из первых этапов в проектировании электростанции. Срок строительства может достигать 15 лет. В таких условиях при многокритериальной оценке ЛПР испытывает затруднения в сравнении критериев по важности, его предпочтения размыты.

4) Слабоструктурированность задачи выбора пункта, что обуславливается наличием неопределенности и неполнотой исходной информации, наличием факторов, не поддающихся количественной оценке (условия строительства, оценка перспектив развития района). 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, в отдельных случаях возможно

получение только сравнительных оценок альтернатив по критериям.

При выборе площадки размещения или мощности электростанции, напротив, преобладают критерии с количественным описанием (расстояния от площадки до населенных пунктов, центров электрических нагрузок и т.п.).

В связи с отмеченными факторами, принятие решений по выбору пунктов в настоящее время осуществляется без должной степени формализации, что в конечном итоге отражается на результатах выбора.

В статье предлагается методика двухуровневого многокритериального анализа пунктов размещения электростанций, будет предложен подход к учету размытых предпочтений ЛПР при сравнении критериев.

1. Постановка задачи

Задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – множество альтернатив первого уровня (АПУ), которые оцениваются по множеству критериев $F = F_1 \cup G$. Подмножество критериев $F_1 = \{f_1, f_2, \dots, f_s\}$ служит для оценки альтернатив только первого уровня, подмножество критериев $G = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ – для оценки альтернатив и первого, и второго уровней (АВУ). Каждому элементу a_i множества A ставится в соответствие множество возможных АВУ $B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом многокритериальных оценок альтернатив множеств B_i .

2. Обоснование применения методов MAUT и АНР

Анализ альтернатив на двух уровнях отличается числом альтернатив, а также описанием критериев из-за разной степени детализации исходной информации. Целесообразно использовать различные методы многокритериального анализа, более эффективные для конкретных условий на двух уровнях. Под эффективностью метода будем понимать продуктивность использования получаемой от ЛПР информации для оценивания или сравнения альтернатив. Так, в качестве основных показателей эффективности может служить число запросов к ЛПР; число преобразований информации из

количественной в качественную и наоборот, число параметров в запросах к ЛПР.

Так, альтернативы второго уровня, как правило, характеризуются критериями, по которым может быть дана количественная оценка. Число альтернатив потенциально не ограничено [4-6]. Многокритериальный анализ в таких условиях может эффективно проводиться методом MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), применявшимся для решения многих практических задач [1, 2]. Метод обладает такими преимуществами, как аксиоматическое обоснование, возможность количественной оценки большого числа альтернатив, возможность анализа альтернатив в условиях риска, проработанность способов выявления предпочтений ЛПР [7]. Методы, основанные на парных сравнениях, например метод анализа иерархий АНР (Analytic Hierarchy Process) [8], позволяют проводить анализ альтернатив с количественными и качественными оценками, но не могут эффективно применяться при большом числе альтернатив из-за высокой загрузки ЛПР и проблемы согласованности ответов. Пороговые методы группы ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la REalite) также предполагают анализ небольшого числа альтернатив, кроме того при анализе альтернатив могут возникать циклы [7]. Группа пороговых методов PROMETHEE имеет недостаточно проработанные процедуры определения весовых коэффициентов [9]. Группы эвристических методов, например SMART, SMARTS, SMARTER [10], в отличие от MAUT, не имеют математического обоснования, что является существенным недостатком при решении ответственных задач, к которым также относится и размещение электростанций. Метод последовательного сужения множества Парето [11], позволяющий исключать альтернативы на основании количественной информации об относительной важности критериев, как и MAUT, потребует преобразования качественных оценок в количественные. Однако дополнительно возникает проблема неопределенности в числе запросов к ЛПР об относительной важности критериев, которые потребуются для сужения исходного множества альтернатив до одной лучшей [11]. Также, для использования метода необходима трудоемкая проверка инвариантности отношений относительно линейного положительного преобразования, инвариантности отношений предпочтений для любых

пар критериев [11]. Кроме того, метод позволяет лишь выделить ограниченное число лучших альтернатив, но не позволяет получить количественные оценки и выразить степень превосходства. Вербальные методы анализа в условиях превалирования количественных критериев не могут быть эффективно применены, несмотря на их важное преимущество – большее соответствие возможностям человека по обработке и анализу информации [8]. В связи с этим, с позиций математической обоснованности, затрат усилий ЛПР при большом числе альтернатив, возможности получения в результате не только ранжирования, но и оценок альтернатив, возможности проведения анализа в условиях риска был выбран метод MAUT.

Альтернативы первого уровня также могут характеризоваться критериями, имеющими количественное описание, но в большей степени для описания альтернатив привлекаются критерии с качественным описанием, а также критерии, по которым могут быть даны сравнительные оценки. Число альтернатив на первом уровне, как правило, не превышает 10 [4-6]. Для описанных условий эффективен метод АНР [8, 12] и группа методов вербального анализа [8].

Методы вербального анализа в условиях превалирования критериев с качественным описанием весьма эффективны, но некоторым из них свойственен ряд недостатков применительно к рассматриваемой задаче. Например, группа методов ЗАПРОС (Замкнутые Процедуры у Опорных Ситуаций) [8] эффективна, когда оценки по критериям имеют качественное описание с небольшим (3-4) числом градаций оценок. Поскольку для альтернатив первого уровня привлекаются также критерии с количественным описанием, формирование шкал с 3-4 качественными оценками может существенно снизить точность анализа. Метод вербального анализа ШНУР (Шкала Нормализованных Упорядоченных Различий) позволяет проводить сравнение альтернатив по качественным и количественным критериям. Однако в основу метода положены следующие допущения: ЛПР может сравнивать по предпочтительности две альтернативы, отличающиеся оценками только по двум критериям; ЛПР может сравнивать по предпочтительности две альтернативы, отличающиеся более чем по двум критериям, если при этом одна альтернатива предпочтительнее другой по одному критерию и уступает ей не

более чем по трем критериям [8]. Известный метод и система поддержки принятия решений UniComBos (UNIt COMparison for the Best Object Selection) [13, 14], основанные на принципах вербального анализа решений [8], позволяют осуществить многокритериальный выбор с учетом возможностей человека при обработке информации, имеют специальные процедуры проверки согласованности, а также обеспечивают возможность для ЛПР постепенно улучшать правила принятия решений, интерпретации полученных сравнений. Кроме того, вербальные методы, в целом, более «прозрачны», малочувствительны к ошибкам измерения и менее трудоемки для человека. Вместе с тем, методы вербального анализа, по сравнению с АНР, имеют меньшую «разрешающую способность», так как относительно большая часть альтернатив остается несравнимой [7].

Метод АНР – один из наиболее известных методов принятия решений, имеет широкую апробацию, реализован в виде многочисленных систем поддержки принятия решений [12]. Распространению АНР способствовали удобство для ЛПР парных сравнений альтернатив и критериев, отсутствие необходимости назначения абсолютных оценок альтернативам. Метод АНР подвергается критике за невыполнение свойства сохранения ранжирования при изменении состава альтернатив [15], за использование допущения о возможности проводить нормализацию приоритетов альтернатив по каждому из критериев в отдельности вне связи с приоритетами самих критериев [16, 17]. В этой связи предложено достаточно большое многообразие модификаций АНР, направленных на устранение недостатков, связанных с процедурой формирования матриц парных сравнений, видом «свертки» критериев [15, 18, 19].

Для сравнения альтернатив на первом уровне был выбран метод АНР в виду того, что часть критериев оценки альтернатив первого уровня имеет количественное измерение, а также в связи с тем, что АНР в равной мере с вербальными методами обладает преимуществом гибкости и простоты использования для ЛПР. Кроме того, АНР позволяет дать количественные оценки при сравнении альтернатив для выражения степени превосходства. Это является важным преимуществом, позволяющим проводить двухуровневый анализ чувствитель-

ности оценок альтернатив к изменениям исходной информации и предпочтений ЛПР.

Итак, в связи с выделенными преимуществами, методы МАУТ и АНР будут использованы в методике двухуровневого многокритериального анализа.

3. Методика двухуровневого многокритериального анализа

На основе выбранных методов многокритериального анализа альтернатив разработана методика, позволяющая уже при анализе пунктов размещения учесть качество дальнейших решений – вариантов площадок, мощности станции (Рис. 1).

Этапы 1, 3-9 соответствуют анализу альтернатив второго уровня методом МАУТ, этапы 1, 2, 10-14 соответствуют анализу альтернатив первого уровня методом АНР. Методом МАУТ предварительно оцениваются варианты реализации электростанции в каждом пункте (например, площадки, мощности), и пункты сравниваются методом АНР в предположении, что именно лучшие варианты будут реализованы. Последовательность выполнения этапов определяется их нумерацией. Стрелками указаны информационные связи между этапами. Так, результаты выполнения этапов 7 и 9 используются на этапах 10, 14, 15.

Рассмотрим подробнее каждый этап предлагаемой методики.

На этапах 1-4 формулируется цель, определяются критерии множества F_1 для оценки пунктов. Для каждого пункта необходимо определить возможные АБУ. Например, в каждом пункте может быть реализовано несколько площадок, на каждой из которых возможно несколько вариантов мощности. Площадка и мощность станции определяют экономические, экологические, социальные воздействия. Выбираются критерии множества G для предварительной многокритериальной оценки вариантов реализации станции. Проводится сбор информации и оценка альтернатив второго уровня.

На этапе 5 в диалоге с ЛПР производится проверка условий-аксиом, при выполнении которых может быть получена многокритериальная функция полезности в аддитивном (1) или мультипликативном виде (2) [1, 2]:

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

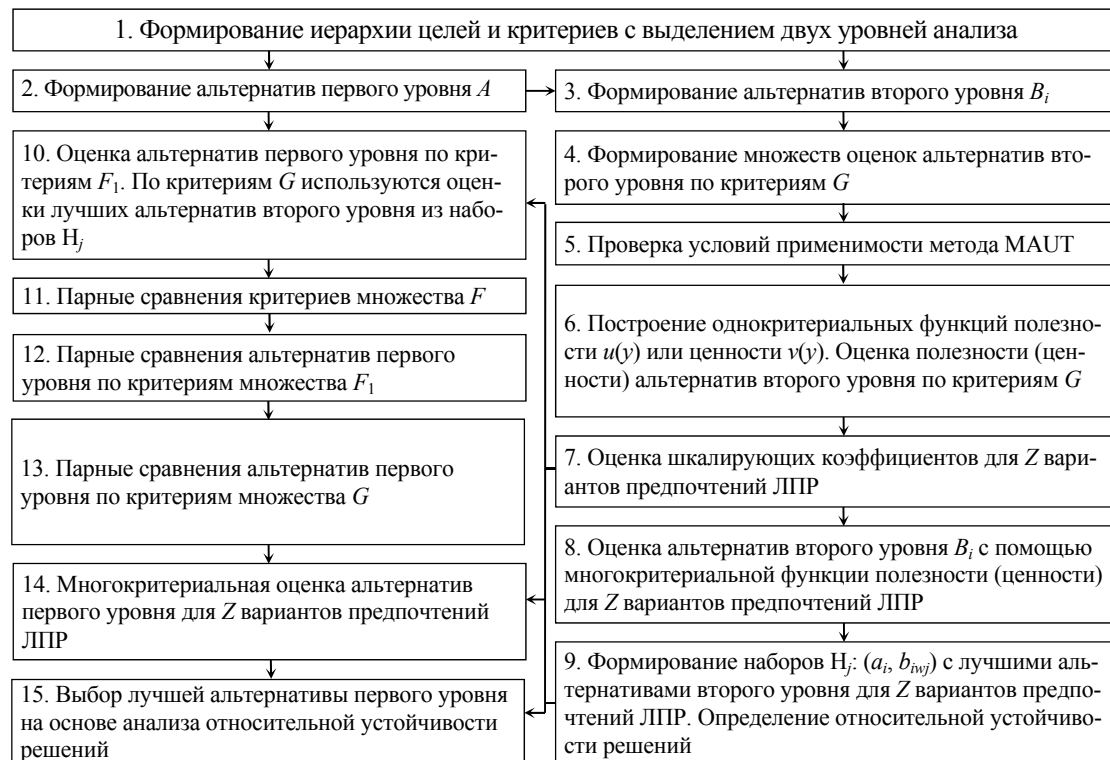


Рис. 1. Методика двухуровневого многокритериального анализа

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

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 определенности, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению позволяет получить многокритериальную функцию ценности в аддитивном виде [1, 2]:

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

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

К настоящему времени предложено множество формулировок условий независимости по предпочтению, полезности, что связано с различными трактовками и модификациями теории полезности, различными видами функций [20]: ординальной и кардинальной функций ценности, функции полезности [1]. Различные формулировки, обусловленные вышеприведенными обстоятельствами, даны в работах [1, 2, 21-23].

В предлагаемой методике при анализе альтернатив в условиях определенности рекомендуется определять ординальную функцию ценности и проводить проверку условий независимости по предпочтению в следующей формулировке [2]: множество критериев Y независимо по предпочтению от дополняющего его множества Z тогда и только тогда, когда структура условного предпочтения в пространстве y при фиксированном z' не зависит от z' . Если каждая пара критериев не зависит по предпочтению от своего дополнения, то критерии взаимонезависимы по предпочтению [2]. Для p критериев существует $p(p-1)/2$ пар критериев, которые должны быть независимыми по предпочтению от их соответствующих дополнений. Однако результаты исследований Леонтьева и Гормана [24, 25] избавляют от большей части проверок на независимость благодаря предложенной и доказанной теореме [2]:

Пусть Y и Z – пересекающиеся подмножества множества критериев G , но ни одно из них не содержится в другом, а их объединение $Y \cup Z$ не совпадает с G . Если каждое из подмножеств Y и Z не зависит по предпочтению от своего дополнения, то не зависит по предпочтению от своего дополнения каждое из следу-

ющих множеств критериев: $Y \cap Z$, $Y \cup Z$, $Y - Z$, $Z - Y$, $(Y - Z) \cup (Z - Y)$.

Эти результаты позволяют сократить число условий независимости по предпочтению, проверка которых необходима для введения аддитивной функции ценности до $p-1$ [2].

При анализе альтернатив в условиях риска предлагается проводить проверку взаимной независимости критериев по полезности, используя следующие формулировки [2]: множество критериев Y не зависит по полезности от дополняющего его подмножества Z тогда и только тогда, когда предпочтения относительно лотерей $(\tilde{y}, z')$ при фиксированном значении z' не зависят от самого значения z' . Критерии множества X называются взаимонезависимыми по полезности, если каждое подмножество критериев Y из всего множества X не зависит по полезности от своего дополнения Z . При p факторах существует $2^p - 2$ подмножества факторов, которые должны быть независимыми по полезности для того, чтобы условие о взаимной независимости по полезности оказалось справедливым [2]. Разработаны более слабые условия, которые позволяют сократить число проверяемых подмножеств до p [2].

Если условие независимости критериев по предпочтению или по полезности не выполняется, рекомендуется перегруппировать или агрегировать зависимые критерии [7]. При анализе в условиях определенности удобным оказывается также понятие частично аддитивной функции ценности. Частичная аддитивность может выполняться, даже если взаимонезави-

симость критериев по предпочтению не имеет места, но построение функции ценности при этом существенно облегчается [2, 26, 27].

Для повышения качества проверки независимости критериев по предпочтению рекомендуется привлекать в анализ дополнительные процедуры. Например, в работе [28] показано, что использование правила «сложения» отношений предпочтений позволяет выявить нарушение независимости критериев по предпочтению.

На этапе 6 в диалоге с ЛПР определяются однокритериальные функции полезности (ценности), которые отражают полезность u каждого исхода (оценки) y_g для ЛПР по критерию g с учетом его отношения к риску. Для построения однокритериальных функций требуется минимум $3p$ запросов к ЛПР (p – число критериев).

На этапе 7 проводится определение шкалирующих коэффициентов с участием ЛПР, которое сравнивает критерии по важности между собой. В случае, когда ЛПР затрудняется точно сопоставить критерии по важности, предлагается дать ему возможность задавать соотношения критериев интервально, тем самым снизив нагрузку на ЛПР. Предлагается соответствующая методика учета размытых предпочтений ЛПР в отношении критериев. На Рис. 2 представлена стандартная и предлагаемая процедуры определения шкалирующих коэффициентов.

При определении шкалирующих коэффициентов необходимо учитывать ограниченные возможности людей по обработке и анализу информации. Устойчивые сравнения ЛПР могут проводить лишь при 2-3 критериях [8, 29], что связано с ограниченным объемом кратко-

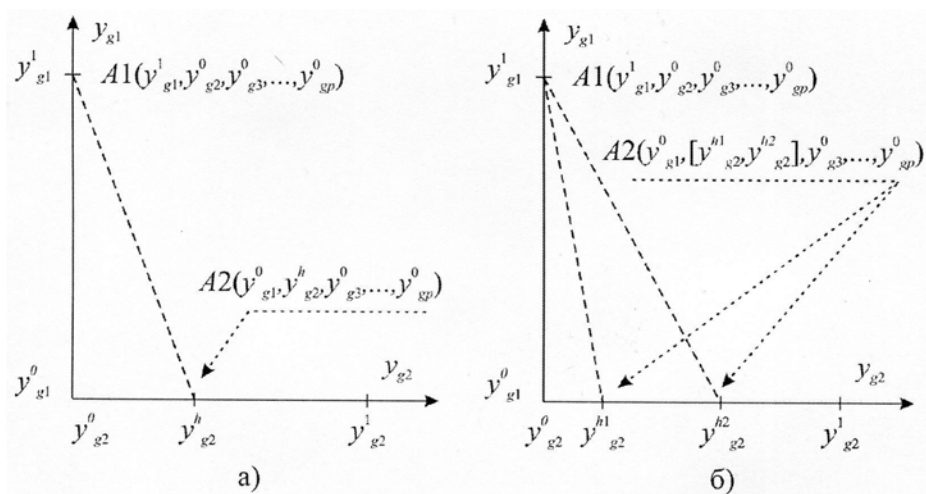


Рис. 2. Процедуры определения шкалирующих коэффициентов
а) стандартная; б) предлагаемая

временной памяти человека [30, 31]. Согласно стандартной процедуре, работа ведется не со всеми критериями одновременно, а с парами критериев, например g_1 и g_2 , а оценки остальных критериев фиксируются на худшем уровне. Формируется искусственная альтернатива $A1$ с лучшей оценкой по менее важному критерию и худшей оценкой по более важному критерию. Затем предлагается определить равноценную альтернативу $A2$, с худшей оценкой по менее важному критерию (Рис. 2, а) [1, 2].

Для случая, когда однозначно дать ответ затруднительно, ЛПР предлагается определить два значения границ интервала y_{g2}^{h1} и y_{g2}^{h2} (Рис. 2, б). Выбирается шаг разбиения, и каждый интервал заменяется конечным числом t оценок y_g^{ht} . При p критериях это, в общем случае, обуславливает формирование $Z=t^{p-1}$ систем линейных уравнений и, соответственно, Z вариантов шкалирующих коэффициентов. Изменения шкалирующих коэффициентов влекут изменения значений функций (1), (2) или (3) и оценок АВУ. Поэтому оценки альтернатив второго уровня формируются для каждого варианта предпочтений Z (этап 8, Рис. 1). Процедура определения шкалирующих коэффициентов может быть совмещена с процедурой проверки независимости критериев по предпочтению. В таком случае определение значений всех шкалирующих коэффициентов требует $3(p-1)$ запрос к ЛПР при точном задании равноценных альтернатив и $4(p-1)$ – при интервальном (p – число критериев).

Рассмотрим пример. На Рис. 3, а представлены оценки альтернатив второго уровня пункта П1. При всех вариантах предпочтений Z

ранжирование АВУ не меняется, поэтому для пункта П1 выбирается только АВУ1 для анализа на первом уровне. На рис. 3б представлены оценки альтернатив второго уровня пункта П2. Ранжирование АВУ меняется, поэтому для пункта П2 необходимо рассматривать в дальнейшем АВУ1 и АВУ2. Таким образом, по результатам анализа АВУ пунктов П1, П2, будут сформированы наборы $H_1=[(П1, АВУ1), (П2, АВУ1)]$; $H_2=[(П1, АВУ1), (П2, АВУ2)]$ с лучшими АВУ. На первом уровне анализа (этапы 10-15, Рис. 1) пункты будут сравниваться в предположении, что в них будут реализованы АВУ соответствующих наборов.

Итак, на этапе 9 (Рис. 1) для дальнейшего анализа формируются наборы $H_1, \dots, H_n$ лучших АВУ в зависимости от варианта предпочтений Z : $H_j=[(a_1, b_{1wj}), (a_2, b_{2wj}), \dots, (a_i, b_{iwj}), \dots, (a_k, b_{kwj})]$.

На этапе 9 также определяется относительная устойчивость решений (ОУР), представляющая собой сумму диапазонов устойчивых решений для каждого набора. Диапазоном устойчивых решений будем называть интервал, внутри которого не изменяются лучшие альтернативы второго уровня для всех рассматриваемых пунктов. Сумма таких интервалов определяет относительную устойчивость решений для каждого набора H_j . ОУР по каждому набору отражает степень склонности ЛПР к выбору каждого такого набора. Для определения ОУР используется формула:

$$S_j = \sum_{i=1}^m D_{ij} \quad (4)$$

где S_j – ОУР j -го набора H_j , %; D_{ij} – i -й диапазон устойчивых решений по j -му набору, %.

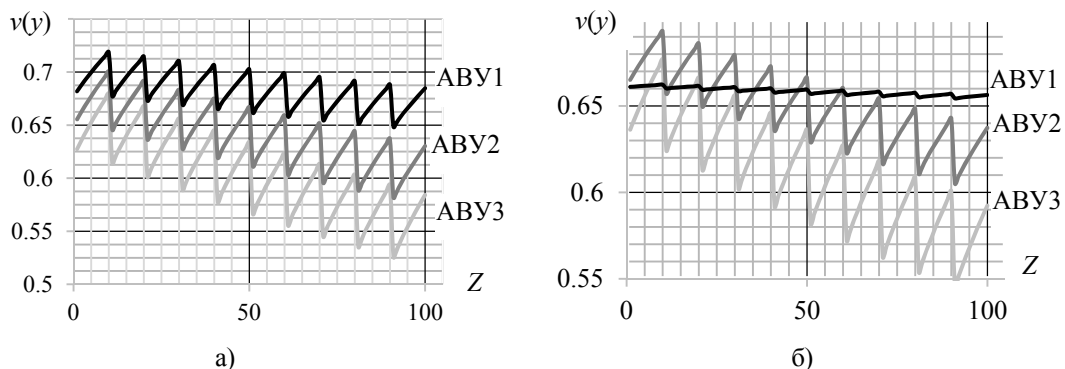


Рис. 3. Определение лучших альтернатив второго уровня с учетом интервально заданных предпочтений ЛПР
а) ранжирование АВУ сохраняется; б) не сохраняется

Определенные на этапе 9 ОУР будут использоваться на этапе 15 (Рис. 1) в качестве показателя для осуществления лицом, принимающим решения, окончательного выбора.

Таким образом, в результате выполнения этапов 1-9 предложенной методики (Рис. 1) формируются наборы лучших альтернатив второго уровня. Этот результат позволяет перейти к анализу альтернатив первого уровня.

На этапе 10 (Рис. 1) дается описание оценок по критериям множества F_1 для альтернатив первого уровня. На этапе 11 сравниваются попарно критерии множества F при помощи известной шкалы (Табл. 1), заполняются матрицы парных сравнений [8, 12].

Затем аналогично проводятся парные сравнения альтернатив первого уровня отдельно по каждому критерию: 1) множества F_1 (этап 12, Рис. 1); 2) множества G (этап 13, Рис. 1). Вычислив собственные вектора матриц парных сравнений, проведя нормирование элементов собственных векторов, можно получить веса критериев и альтернатив. Определение собственного вектора матрицы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ может быть проведено по известному выражению [8, 12]:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n c_{ij}} \quad (5)$$

где λ_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий альтернативе или критерию i ; c_{ij} – оценка шкалы парных сравнений альтернатив или критериев i и j ; n – число альтернатив или критериев.

Вес критерия w_i или альтернативы v_{ij} определяется путем нормирования элементов собственного вектора. Например, вес критерия определяется [12]:

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (6)$$

На этапе 14 проводится оценка альтернатив с учетом всех критериев [12]:

$$V_{jk} = \sum_{i=1}^n w_i v_{ijk} \quad (7)$$

где V_{jk} – показатель качества j -й альтернативы k -го набора H_k ; w_i – вес i -го критерия; v_{ijk} – вес j -й альтернативы по i -му критерию из k -го набора альтернатив H_k .

Табл. 1. Относительная шкала сравнения

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Значительное превосходство	5
Явное превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

Выбор лучшей альтернативы первого уровня на этапе 15 предлагается проводить с использованием выражения:

$$W_j = \sum_{k=1}^H S_k V_{jk} \quad (8)$$

где W_j – вес j -й альтернативы с учетом ОУР; S_k – ОУР по k -му набору H_k ; V_{jk} – вес j -й АПУ k -го набора.

Число запросов к ЛПР при сравнении альтернатив первого уровня методом АНР для всех наборов можно определить по выражению:

$$Q = \frac{n(n-1)}{2} + n \frac{k(k-1)}{2} + (h-1)p \frac{k(k-1)}{2} \quad (9)$$

где n – число критериев оценки альтернатив первого уровня; k – число альтернатив первого уровня; h – число наборов лучших альтернатив второго уровня; p – число критериев оценки альтернатив второго уровня.

Таким образом, при помощи методики двухуровневого многокритериального анализа определяется лучший пункт размещения электростанции. Рассмотрим пример применения разработанной методики.

4. Применение методики

Применение методики двухуровневого многокритериального анализа рассмотрим на примере выбора пункта размещения гидроэлектростанции (ГЭС) на реке Индигирке в республике Саха (Якутия). Для сравнения были выбраны 5 пунктов возможного размещения ГЭС, два из которых (П2, П5) были намечены Институтом физико-технических проблем Севера (Рис. 4) [32, 33].

Каждый пункт размещения характеризуется своей инфраструктурой, условиями для строительства, перспективами развития и т.п. Так, пункт П1 намечен вблизи поселка Хонуу, перспективу которого определяет планируемое строительство стратегической железнодорожной линии Якутск – Мома – Магадан. Кроме того, от поселка Хонуу Индигирка судоходна,



Рис. 4. Ситуационный план района

поэтому в перспективе поселок может стать крупным транспортным узлом.

Пункт П4 намечен вблизи поселка городского типа Усть-Нера, расположенного вблизи богатейших месторождений золота, сурьмы,

вольфрама. Через поселок проходит федеральная автомобильная дорога Р504 «Колыма», связывающая Якутск и Магадан.

Пункт П3 намечен вблизи поселка городского типа Предпорожный, упраздненного в 2007 году. Также имеются месторождения золота, угля. Размещение ГЭС между поселками Хонуу и Усть-Нера позволяет влиять на развитие двух районов.

В каждом пункте были проведены водно-энергетические расчеты [33]. Согласно им, в каждом пункте были намечены нормальные подпорные уровни (НПУ) водохранилищ ГЭС с шагом 10 м. В соответствии с этим определялись уровни затопления водохранилищ, мощности станций и их стоимость [33]. Таким образом, альтернативами первого уровня являются пункты размещения, а альтернативами второго уровня – НПУ, каждый из которых определяет мощность станции, ее стоимость, а также площадь затопляемых земель.

Согласно разработанной методике (Рис. 1) определяется иерархия целей и критериев решаемой задачи с выделением двух уровней альтернатив (Рис. 5).

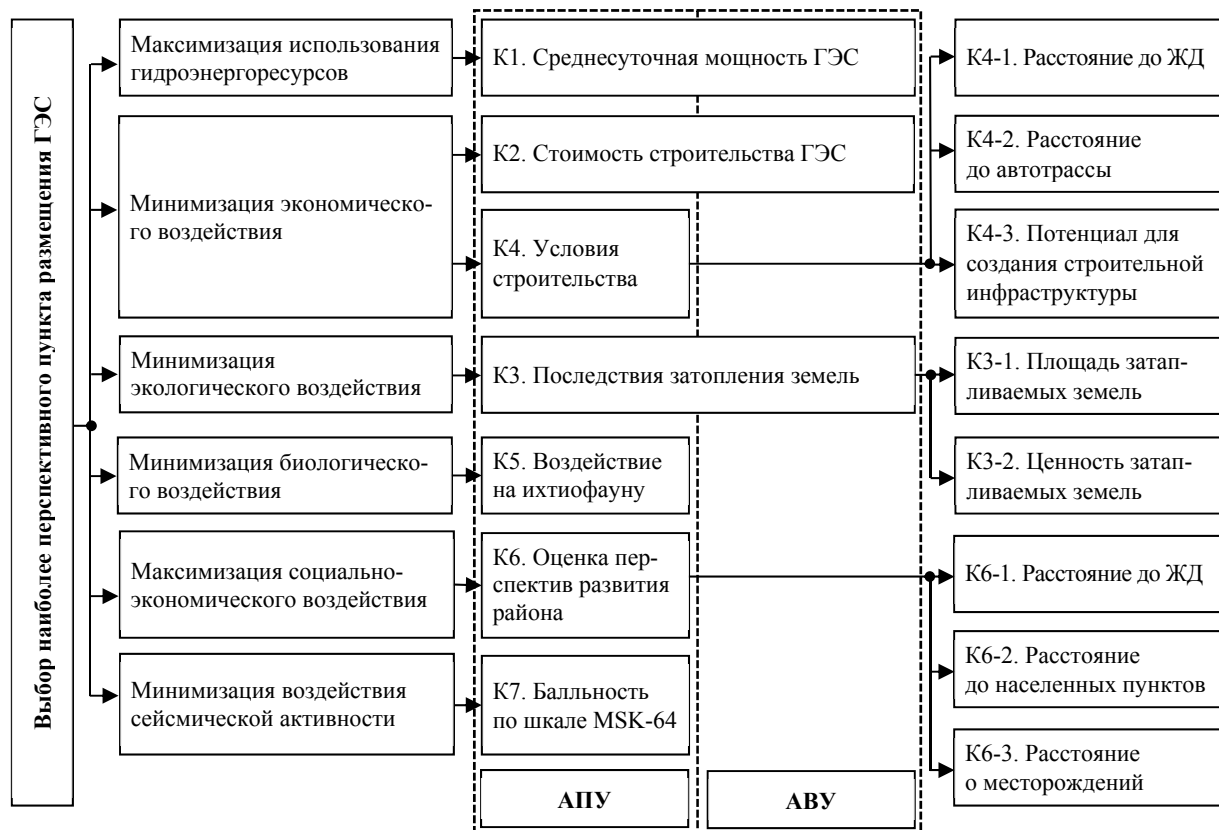


Рис. 5. Иерархия целей и критериев задачи выбора пункта размещения ГЭС

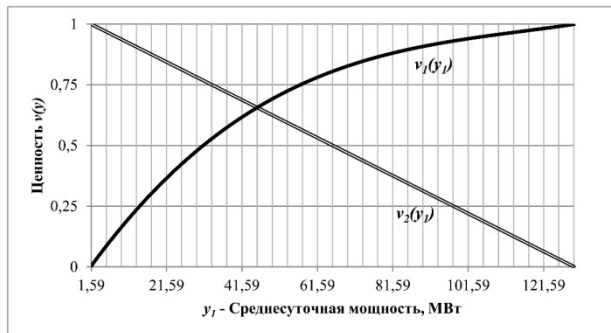


Рис. 6. ОФЦ критериев y_1 (K1) – среднесуточная мощность ГЭС $v_1(y_1)$; y_2 (K2) – стоимость строительства ГЭС $v_2(y_1)$

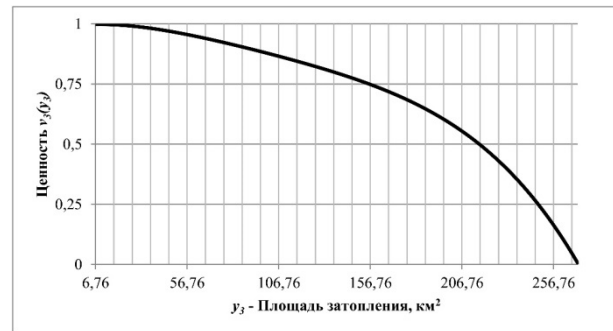


Рис. 7. ОФЦ субкритерия y_{3-1} (K3-1) – площадь затопляемых земель $v_{3-1}(y_{3-1})$

На этапах 2 и 3 формируются множества альтернатив первого уровня (пунктов) и альтернатив второго уровня (вариантов НПУ) соответственно. На этапе 4 формируется множество оценок АВУ по критериям множества G (критерии K1, K2, K3, Рис. 5). На этапе 5 проверяются условия применимости метода МАУТ.

На этапе 6 проводится построение однокритериальных функций ценностей (ОФЦ) для критериев K1, K2 и субкритерия K3-1 (Рис. 6, Рис. 7). Оценки ценности альтернатив по критерию K3-2 устанавливались в зависимости от площади затопляемых земель, наличия в них залежей драгоценных и цветных металлов и котировок цен на них. Для оценки альтернатив по критерию K3 была получена двухкритериальная функция ценности.

ОФЦ позволяет дать оценку ценности для ЛПР любому варианту НПУ по соответствующему критерию.

На этапе 7 определяются шкалирующие коэффициенты в условиях размытых предпочтений ЛПР (Рис. 8).

Согласно предлагаемой методике учета размытых предпочтений ЛПР, определяются две границы интервала соотношения важности для двух критериев. Так, на Рис. 8, а для ЛПР альтернатива A1 с лучшей оценкой по критерию K1 равной 129,38 МВт [33] и с худшими оценками по критериям K2 и K3 со значениями 25,95 млрд. руб. и 0 о.е. соответственно, равна по важности альтернативе A2 с худшими оценками по критериям K1 и K3 (1,59 МВт и 0 о.е. соответственно) и выбранной интервальной оценкой по критерию K2: от 25,95 до 16,8 млрд. руб.

Полученный интервал разбивается на $t=10$ оценок. Аналогичные операции проводятся для пары критериев K2 и K3 (Рис. 8, б). Таким образом, для критериев K1, K2 и K3 формируется $Z=10^{3-1}=100$ систем линейных уравнений и, соответственно, 100 вариантов шкалирующих коэффициентов. Последние, в свою очередь, участвуют в формировании 100 многокритериальных функций ценности, по которым оценивается каждая альтернатива второго уровня (этап 8). На Рис. 9 представлены графики изме-

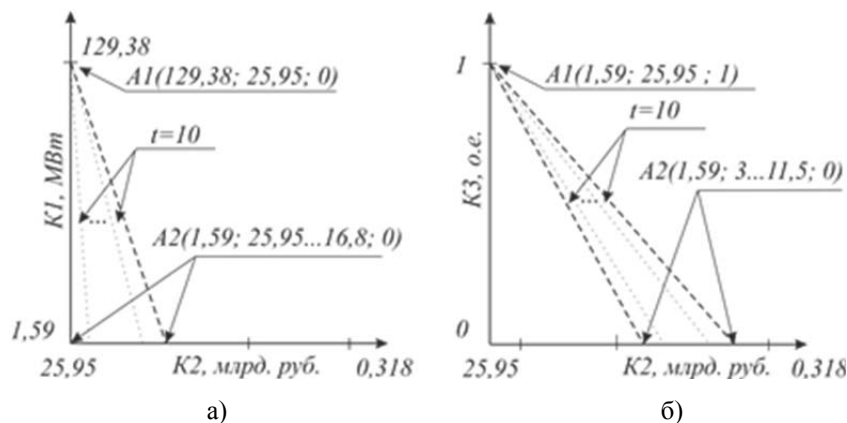


Рис. 8. Определение шкалирующих коэффициентов с учетом размытых предпочтений ЛПР

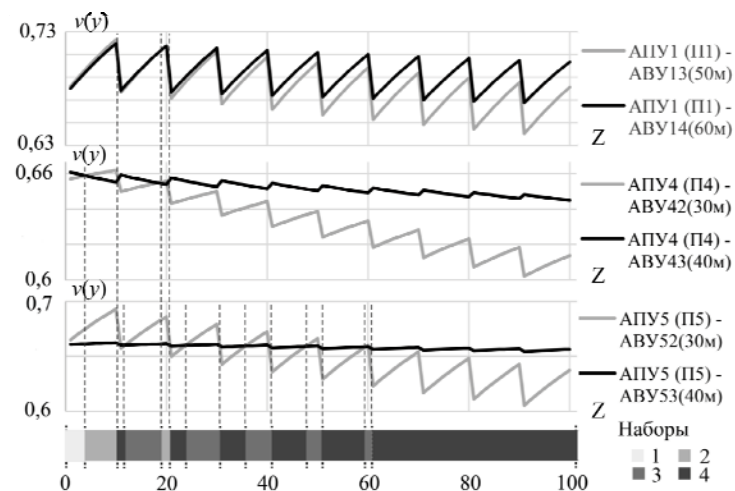


Рис. 9. Зависимости оценок АБУ от вариантов предпочтений Z и выделенные четыре диапазона устойчивых решений

нения 100 полученных многокритериальных оценок для каждой альтернативы второго уровня для пунктов П1, П4, П5. По пунктам П2 и П3 ранжирование АБУ не менялось, поэтому для них графики не приводятся.

В зависимости от многокритериальной оценки, определяемой для каждого из 100 вариантов предпочтений ЛПР, в каждом пункте лидирует та или иная альтернатива второго уровня. Так, для АПУ1 (П1) в первых $Z=1 \div 10$ случаях лидировала АБУ13 (НПУ 50м), в следующих $Z=10 \div 18$ – АБУ14 (НПУ 60м), в следующих $Z=18 \div 20$ – АБУ13 (НПУ 50м), в следующих $Z=20 \div 100$ – АБУ14 (НПУ 60м). Такое поочередное лидерство альтернатив второго уровня по каждому пункту приводит к формированию нескольких наборов лучших альтернатив второго уровня. Сумма (в единицах Z) каждого отдельного набора лучших АБУ представляет собой относительную устойчивость решений, приведена в нижней части рисунка. Четыре набора лучших АБУ и соответствующие им ОУР приведены в Табл. 2.

ОУР, представленные в Табл. 2, отражают склонность ЛПР к тому или иному набору при его существующих предпочтениях. Для выявления лучшей АПУ необходимо проведение дальнейшего анализа с учетом полученных ОУР.

Дальнейший анализ будет проводиться на основании всех семи критериев К1-К7 при помощи метода АНР (Рис. 5). В Табл. 3 представлена матрица парных сравнений пунктов по критерию К1 для первого набора лучших альтернатив второго уровня. Например, при срав-

Табл. 2. Наборы лучших АБУ (варианты ГЭС)

Набор	НПУ ГЭС, м					ОУР, %
	П1	П2	П3	П4	П5	
1	50	50	40	40	30	3
2	50	50	40	30	30	9
3	60	50	40	40	30	23
4	60	50	40	40	40	65

Табл. 3. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию К1

Альтернатива	П1	П2	П3	П4	П5	Вес
П1	1	0,5	1	0,2	5	0,117
П2	2	1	3	0,25	6	0,208
П3	1	0,333	1	0,167	4	0,099
П4	5	4	6	1	9	0,542
П5	0,2	0,167	0,25	0,111	1	0,033

нении пунктов П2 и П3 ЛПР отметил умеренное превосходство П2, что соответствует оценке 3 согласно Табл. 1.

Аналогичные расчеты проводились для всех 4 наборов альтернатив. Матрица парных сравнений критериев К1-К7 представлена в Табл. 4.

Результаты расчета по каждому набору представлены в Табл. 5.

Используя полученные ранее ОУР для каждого набора и формулу (8), определим финальные веса для каждого пункта размещения ГЭС (Табл. 6).

Таким образом, проведя двухуровневый многокритериальный анализ пунктов размещения ГЭС, с позиции предпочтений ЛПР лучшим является пункт П4. Район, соответствующий этому пункту, отличается высокими перспективами

Табл. 4. Матрица парных сравнений критериев K1-K7

Критерий	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Вес
K1	1	0,5	3	0,5	5	0,5	5	0,140
K2	2	1	5	1	7	1	7	0,246
K3	0,333	0,2	1	0,2	3	0,2	3	0,059
K4	2	1	5	1	7	1	7	0,246
K5	0,2	0,142	0,333	0,142	1	0,142	1	0,030
K6	2	1	5	1	7	1	7	0,246
K7	0,2	0,142	0,333	0,142	1	0,142	1	0,030

Табл. 5. Веса, полученные по каждому пункту для 4-х наборов

Набор	П1	П2	П3	П4	П5
H ₁	0,212	0,156	0,154	0,262	0,216
H ₂	0,204	0,182	0,142	0,267	0,203
H ₃	0,222	0,156	0,163	0,237	0,220
H ₄	0,211	0,186	0,230	0,227	0,143

Табл. 6. Веса альтернатив первого уровня, полученные с использованием ОУР

Пункт	П1	П2	П3	П4	П5
Вес	0,213	0,178	0,204	0,234	0,168

развития, условиями строительства, гидрологическими характеристиками. В районе сосредоточено большое число месторождений, которые в перспективе дадут толчок развитию района. Благоприятным для условий строительства является наличие жилого поселка Усть-Нера, автотрассы. Кроме этого учитывались биологические, социальные, экономические и экологические факторы, повлиявшие на выбор пункта.

Недостатком данного пункта является его значительная удаленность от железной дороги Якутск-Мома-Магадан, которая может быть построена в перспективе до 2030 года. Однако, несмотря на это, с учетом всех критериев оценки и выраженных предпочтений пункт П4 является наилучшим.

Результаты настоящего исследования получены с учетом многих критериев на двух уровнях анализа, а также размытых предпочтений ЛПР.

При анализе альтернатив второго уровня методом МАУТ для условий трех критериев было составлено 26 запросов к ЛПР. Сравнение альтернатив первого уровня по субкритериям K4-1, K4-2, K4-3; K6-1, K6-2, K6-3 (Рис. 5) методом АНР потребовало 66 запросов к ЛПР. Сравнение альтернатив первого уровня по критериям K1-K7 потребовало 181 запрос к ЛПР для 4 наборов альтернатив второго уровня. Таким образом, суммарное число запросов составило 273. Следует отметить, что 247 запросов к ЛПР

были в наиболее легкой и естественной для него форме парных сравнений критериев или альтернатив. Сравнительно большое число запросов к ЛПР оправдывается необходимостью получения как можно более взвешенного решения такой сложной комплексной задачи как размещение электростанции – объекта, который будет оказывать воздействие несколько десятилетий.

Заключение

В настоящее время процесс принятия решений по выбору пунктов размещения электростанций не имеет методического обеспечения, соответствующего сложности этой задачи. В результате применения неформализованных подходов к выбору пунктов могут быть исключены из рассмотрения перспективные альтернативы, приняты решения, не обеспечивающие высоких оценок по социальным, экологическим, биологическим и другим критериям. Для повышения качества принимаемых решений предложена методика двухуровневого многокритериального анализа альтернатив. Ее особенностью является применение двух методов, наиболее соответствующих специфике сравниваемых альтернатив, применение процедуры учета размытых предпочтений ЛПР.

Методика двухуровневого многокритериального анализа может быть использована на стадии предпроектных исследований при выборе пункта размещения электростанций, когда известны лишь ориентировочные данные по проблеме. Кроме того, методика может быть использована при решении задач размещения иных объектов, связанных с рассмотрением альтернатив на двух уровнях анализа с учетом многих критериев оценки. Примерами таких объектов могут быть сооружения производственного назначения (в химической и нефтехимической, лесной и деревообрабатывающей промышленности, заводы тяжелого машиностроения и т.д.).

Литература

- Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 320 с. (Keeney R. Siting Energy Facilities. – Academic Press, New York, 1980, 432 p.)
- Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях. Предпочтения и замещения / Пер. с англ. / Под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с. (Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. – Wiley, 1976, 569 p.)
- Основные требования к разработке технико-экономического обоснования строительства атомной станции. Положение о порядке выбора площадки строительства. НД п. 4.2 СППНАЭ-93 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/7/7920/ (Дата обращения: 03.10.2016).
- Панкратьев П.С. Поддержка принятия решений при размещении электростанций на основе двухуровневого многокритериального анализа с применением методов МАУТ и МАИ // Системные исследования в энергетике / Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 44. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – 175 с.
- 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.
- 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.
- Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
- Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. Ин-т системного анализа РАН. – М.: Наука, 2006. – 181 с.
- Velasquez M., Hester P.T. 2013. An analysis of multicriteria decision making methods // International Journal of Operations Research. 10: 56–66.
- Edwards W., Barron F.H. 1994. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multi-attribute utility measurement. Organizational Behavior and Human Decision Processes. 60(3): 306-325.
- Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.
- Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
- Ларичев О.И., Ашихмин И.В., Ройзензон Г.В., Фуремс Е.М. Поддержка выбора лучшего объекта на основе независимости критериев по предпочтениям и транзитивности // Новости искусственного интеллекта №4(58), 2003, С. 12-19.
- Ashikhmin I., Furems E. 2005. UniComBos – intelligent decision support system for multicriteria comparison and choice // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 13(2-3): 147–157.
- Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. № 7. С. 1261-1270.
- Подinovский В.В., Подinovская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8-13.
- Подinovский В.В., Подinovская О.В. Ещё раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 75-78.
- Колесникова С.И. Особенности применения линейной свертки критериев в методе парных сравнений // Информационные технологии. 2011. № 1. С. 24-29.
- Орлов А.И. Теория экспертных оценок в нашей стране // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 93. С. 1-11.
- Schoemaker P. J.H. 1982. The expected utility model: its variants, purposes, evidence and limitations // Journal of economic literature, 2: 529–563.
- Dyer J.M., Sarin R.K. 1979. Measurable multiattribute value function // Operations research. 4: 810-822.
- Miyamoto J. M., Wakker P. P. 1996. Multiattribute utility theory without expected utility foundations. Operations Research. 44(2): 313-326.
- von Winterfeldt D., Edwards W. Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge, Cambridge University Press, 1986, 604 p.
- Gorman W. M. 1968. The structure of utility functions. Review of Economic Studies. 35: 367-390.
- Gorman W.M. 1968. Conditions for additive separability. Econometrica. 36: 605-609.
- Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
- Larichev O., Olson D. Multiple criteria analysis in strategic siting problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. – 217 p.
- Ашихмин И.В., Ройзензон Г.В. Выбор лучшего объекта на основе парных сравнений на подмножествах критериев // Методы принятия решений: Сборник трудов Института системного анализа Российской академии наук. М.: Эдиториал УРСС, 2001. – С. 51-71.
- Russo J. E., Rosen L. D. 1975. An eye fixation analysis of multialternative choice // Memory and cognition. 3: 267-276.
- Simon H. The Sciences of the artificial. Third Edition. Cambridge, MA, MIT Press, 1996, 246 p.

31. Tversky A., Kahneman D. 1974. Judgement under uncertainty: heuristics and biases // Science. 185: 1124-1131.
32. Ноговицын Д. Д. Водные ресурсы Якутской АССР и их использование. – Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1985. – 124 с.
33. 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.

Шакиров Владислав Альбертович. Декан факультета энергетики и автоматики ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» (Россия, Братск). Окончил Братский государственный технический университет в 2004 году. Кандидат технических наук, доцент. Количество печатных работ: 65, в том числе одна монография. Область научных интересов: принятие решений, энергетика, проблема размещения энергетических объектов. E-mail: mynovember@mail.ru

Панкратьев Павел Сергеевич. Доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» (Россия, Братск). Окончил Братский государственный технический университет в 2011 году. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 19. Область научных интересов: принятие решений, энергетика, проблемы окружающей среды. E-mail: scud33@inbox.ru

Technique of multi-attribute two-level analysis of power plant sites

V.A. Shakirov, P.S. Pankrat'ev

Abstract. In this paper, decision-making problem of power plant siting is considered. One of the stages of the problem, which is geographic area selection, is the most complex on such factors as multicriteriality, high degree of data uncertainty, semi-structure. Especially complicating geographic area selection is that further tentative decision demands such as choosing of plant sites and power plant capacity. For the best decision on geographic area selection multi-attribute problem with two levels of alternatives, which are areas and embodiments of the power plant, is formulated. In view of the fact that alternatives analysis conditions on two levels are different, two multi-attribute analysis methods are proposed. Technique of multi-attribute two-level analysis of alternatives using analytic hierarchy process and multi-attribute utility theory is proposed. Technique of analysis of alternatives in conditions of decision maker fuzzy preferences in connection with criteria is proposed. An example of geographic area selection of hydroelectric station is given.

Keywords: multi-attribute two-level analysis, multi-attribute utility theory, analytic hierarchy process, siting of hydroelectric station.

References

1. Keeney R. Siting Energy Facilities. – Academic Press, New York, 1980, 432 p.
2. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. – Wiley, 1976, 569 p.
3. Osnovnye trebovaniya k razrabotke tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya stroitel'stva atomnoy stantsii. Polozhenie o poriyadke vybora ploshchadki stroitel'stva. ND p. 4.2 SPPNAE-93 [Basic requirements for the development of a feasibility study for construction of a nuclear power plant. Regulations of the site selection procedure of building. ND p. 4.2. CLRRFNE-93]. Available at: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/7/7920/ (accessed October 3, 2016).
4. Pankrat'ev, P.S. 2014. Podderzhka prinyatiya resheniy pri razmeshchenii elektrostantsiy na osnove dvukhurovneвого mnogokriterial'nogo analiza s primeneniem metodov MAUT i MAI [Decision support at placing plants on the basis of a two-level multi-criteria analysis using MAUT and AHP] // Sistemnye issledovaniya v energetike / Trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN [System Research in Power Engineering / Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Proceedings]. 44: 78-82.
5. Shakirov, V.A., P.S. Pankrat'ev. 2013. Mnogokriterial'nyy dvukhurovnevyy podkhod k vyboru luchshey al'ternativy v ramkakh slabostrukturovannoy problemy [Multi-criteria two level approach to choosing the best alternative within semistructured problem] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii. [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies]. 2: 118-127.
6. Shakirov, V.A., P.S. Pankrat'ev. 2013. Podderzhka prinyatiya resheniy na stadii predproektnykh issledovaniy na osnove dvukhurovneвого mnogokriterial'nogo analiza [Decision making support at the pre-feasibility study stage based on two level multi-attribute analysis] // Prikladnaya informatika [Journal of Applied Informatics]. 6(48): 111-121.
7. Petrovskiy, A.B. 2009. Teoriya prinyatiya resheniy [Decision theory]. Moscow: Academy. 400 p.
8. Larichev, O.I. Verbal'nyy analiz resheniy [Verbal Decision Analysis]. In-t sistemnogo analiza RAN [Institute for Systems Analysis of Russian Academy of Sciences]. Moscow: Science. 181 p.

9. Velasquez M., Hester P.T. 2013. An analysis of multi-criteria decision making methods // *International Journal of Operations Research*. 10: 56–66.
10. Edwards W., Barron F.H. 1994. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multi-attribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. 60(3): 306-325.
11. Nogin, V.D. 2002. Prinyatie resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod [Decision-making in multicriteria environment: quantitative approach]. Moscow: FIZMATLIT. 176 p.
12. Saati, T. L. 2008. Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti [Decision making with dependence and feedback: the analytic network process.]. Moscow: LKI. – 360 p.
13. Larichev, O.I., I.V. Ashihmin, G.V. Roizenzon, E.M. Furems. 2003. Podderzhka vybora luchshego ob"ekta na osnove nezavisimosti kriteriev po predpochteniyam i tranzitivnosti [Decision support on the base of criteria preference-independence and transitivity hypotheses] // *Novosti iskusstvennogo intellekta* [News of artificial intelligence]. 4(58): 12-19.
14. Ashikhmin I., Furems E. 2005. UniComBos – intelligent decision support system for multicriteria comparison and choice // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 13(2-3): 147–157.
15. Nogin, V.D. 2004. Uproshchennyy variant metoda analiza ierarkhiy na osnove nelineynoy svertki kriteriev [A simplified variant of the hierarchy analysis on the ground of nonlinear convolution of criteria] // *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 44(7): 1261-1270.
16. Podinovskiy, V.V., O.V. Podinovskaya. 2011. O nekorrektnosti metoda analiza ierarkhiy [On the theoretical incorrectness of the analytic hierarchy process] // *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 1: 8-13.
17. Podinovskiy, V.V., O.V. Podinovskaya. 2012. Eshche raz o nekorrektnosti metoda analiza ierarkhiy [Another note on the incorrectness of the analytic hierarchy process] // *Problemy upravleniya* [Control Sciences] 4: 75-78.
18. Kolesnikova, S.I. 2011. Osobennosti primeneniya lineynoy svertki kriteriev v metode parnykh sravneniy [Feature of usage of linear convolution of criteria in method of paired comparisons] // *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 1: 24-29.
19. Orlov, A.I. 2013. Teoriya ekspertnykh otsenok v nashey strane [Theory of expert estimates in our country] // *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online scientific journal of Kuban state agrarian university]. 93: 1-11.
20. Schoemaker P. J.H. 1982. The expected utility model: its variants, purposes, evidence and limitations // *Journal of economic literature*, 2: 529–563.
21. Dyer J.M., Sarin R.K. 1979. Measurable multiattribute value function // *Operations research*. 4: 810-822.
22. Miyamoto J. M., Wakker P. P. 1996. Multiattribute utility theory without expected utility foundations. *Operations Research*. 44(2): 313-326.
23. von Winterfeldt D., Edwards W. *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge, Cambridge University Press, 1986, 604 p.
24. Gorman W. M. 1968. The structure of utility functions. *Review of Economic Studies*. 35: 367-390.
25. Gorman W.M. 1968. Conditions for additive separability. *Econometrica*. 36: 605-609.
26. Chemorutskiy, I.G. 2005. Metody prinyatiya resheniy [Decision-making methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg. 416 p.
27. Larichev O., Olson D. Multiple criteria analysis in strategic siting problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. – 217 p.
28. Ashihmin, I.V., G.V. Roizenzon. 2001. Vyor luchshego ob"ekta na osnove parnykh sravneniy na podmnozhestvakh kriteriev [Choosing the best of the object based on pairwise comparisons on subsets of criteria] // *Metody prinyatiya resheniy: Sbornik trudov Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Decision-support methods: Institute for Systems Analysis of Russian Academy of Sciences Proceeding]. Moscow: Editorial URSS. 51-71.
29. Russo J.E., Rosen L.D. 1975. An eye fixation analysis of multialternative choice // *Memory and cognition*. 3: 267-276.
30. Simon H. *The Sciences of the artificial*. Third Edition. Cambridge, MA, MIT Press, 1996, 246 p.
31. Tversky A., Kahneman D. 1974. Judgement under uncertainty: heuristics and biases // *Science*. 185: 1124-1131.
32. Nogovitsyn, D.D. 1985. Vodnye resursy Yakutskoy ASSR i ikh ispol'zovanie [Water resources of the Yakut ASSR and their usage]. Yakutsk: SB AS USSR. 124 p.
33. Pankrat'ev, P.S., V.A. Shakirov. 2012. Mnogokriterial'nyy vybor stvora gidroelektrostantsii na reke Indigirke v respublike Sakha(Yakutiya) [Multiattribute choice of hydroelectric station dam site on the Indigirka river, the Sakha republic (Yakutiya)] // *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 3(15): 71-80.

Shakirov Vladislav Albertovich. Dean of faculty of Energy engineering and automation, Federal state budgetary educational institution of higher education «Bratsk state university» (BrSU). PhD in engineering. Number of publications: 65 and one monograph. Research interests: decision making, power engineering, problem of energy facilities siting.

Pankrat'ev Pavel Sergeevich. Associate professor of Heat power engineering department, Federal state budgetary educational institution of higher education «Bratsk state university» (BrSU). PhD in engineering. Number of publications – 19. Research interests: decision making, power engineering, environmental problems.