

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья  
УДК 621.31<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>

## Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации

Владимир Анатольевич Тремясов<sup>1</sup>, Ольга Анатольевна Григорьева<sup>2</sup>,  
Кара-Кыс Вадимовна Кенден<sup>3</sup>✉

<sup>1,2</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия

<sup>1</sup> [emf\\_tva@mail.ru](mailto:emf_tva@mail.ru)

<sup>2</sup> [Grigorieva.OO@mail.ru](mailto:Grigorieva.OO@mail.ru)

<sup>3</sup> [kuca08@mail.ru](mailto:kuca08@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

**Аннотация.** Цель – разработка методики принятия решения по выбору площадки для размещения солнечно-дизельных систем генерации. При выборе площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации использовалась процедура многокритериальной оценки эффективности вариантов площадки. Выбор площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с применением многокритериального подхода осуществлялся на примере с. Кунгуртуг Республики Тыва. После анализа территории вокруг села были выбраны четыре варианта площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации. В качестве критериев выбраны удобство монтажа и обслуживания солнечно-дизельной системы генерации, рельеф местности и качество грунта, удобство компоновки фотоэлектрического преобразователя, воздействие солнечно-дизельной системы генерации на окружающую среду, возможности дальнейшего расширения системы и потенциал ориентации фотоэлектрического преобразователя. Для оценки значимости коэффициента конкордации определено значение квантили распределения равное 16,2. Табличное значение коэффициента конкордации равно 11,1 – для числа степеней свободы 5 и уровня значимости равного 0,05. Поскольку значение квантили распределения больше табличного значения, то с достоверностью 95% можно утверждать, что коэффициент конкордации является значимым и имеет место согласованности мнений экспертов. В результате ранжирования вариантов площадок экспертами получены относительные оценки эффективности критериальных свойств; по формулам линейного преобразования выполнен перевод численных показателей в относительные оценки. Для среднearифметической и гармонической форм свертки рассчитаны многокритериальные оценки эффективности вариантов. Анализ результатов сравнения вариантов площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации позволил выбрать второй вариант площадки для с. Кунгуртуг (данный вариант имеет наибольшие значения многокритериальной оценки). Разработана методика принятия решений при выборе площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок, позволяющая учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев.

**Ключевые слова:** выбор площадки, критериальные свойства, многокритериальная оценка, солнечно-дизельная система генерации, экспертный метод, интенсивность солнечного излучения

**Для цитирования:** Тремясов В. А., Григорьева О. А., Кенден К. В. Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 601–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems

Vladimir A. Tremyasov<sup>1</sup>, Olga A. Grigorieva<sup>2</sup>, Kara-Kys V. Kenden<sup>3</sup>✉

<sup>1,2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Tuvan State University, Kyzyl, Russia

© Тремясов В. А., Григорьева О. А., Кенден К. В., 2021

<https://vestirgtu.elpub.ru>

<sup>1</sup> emf\_tva@mail.ru

<sup>2</sup> Grigorieva.OO@mail.ru

<sup>3</sup> kuca08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

**Abstract.** The paper aims to develop a site selection procedure for solar-diesel hybrid systems using a multi-criteria performance analysis of site options. The site selection process using this multi-criteria approach was carried out on the example of Kungurtug rural settlement (Tyva Republic). The area surrounding this settlement was analyzed, revealing four possible sites for a solar-diesel system. For evaluating the performance of these site options, the following criteria were adopted: ease of installation and maintenance of the solar-diesel hybrid system; surface topography and soil quality; convenience of the photovoltaic cell layout; environmental impact of the solar-diesel hybrid system; opportunities for further expansion of the system; orientation potential of the photovoltaic cell. In order to assess the significance of the concordance coefficient, the distribution quantile was determined, amounting to 16.2. For 5 degrees of freedom and a significance level of 0.05, the table value of the concordance coefficient amounted to 16.2. Since the distribution quantile is greater than the table value, the concordance coefficient can be considered significant (95% confidence level), indicating agreement between expert opinions. Experts ranked the site options to obtain relative performance estimates for the criteria; numeric indicators were converted into the relative estimates using linear transformation formulas. The multi-criteria performance estimates of the possible options were calculated for arithmetic mean and harmonic convolutions. After comparing the site options for the solar-diesel system, the second variant characterized by the highest criterion scores was selected for Kungurtug settlement. As a result, a site selection procedure for the elements of solar-diesel hybrid systems was developed using the theory of multi-criteria optimization and the method of expert evaluations, allowing a set of technical, economic, climatic, and environmental criteria to be taken into account.

**Keywords:** site selection, criterion properties, multi-criteria assessment, solar-diesel generation system, expert method, solar radiation intensity

**For citation:** Tremyasov V. A., Grigorieva O. A., Kenden K. V. Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):601-610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.

## ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения снижения общих затрат на строительство солнечно-дизельной системы генерации (СДСГ) и повышения эффективности использования ресурсов солнечной энергии выбор площадки для размещения элементов СДСГ является важным стратегическим решением на этапе строительства и эксплуатации СДСГ. Поэтому процесс выбора площадки для размещения элементов СДСГ состоит в рассмотрении потенциальных противоречивых критериев и анализе нескольких возможных вариантов. При этом, учитывая важность решения данного вопроса, лица, принимающие решения (ЛПР), должны выбрать не только подходящую для нынешних условий площадку, но и достаточно гибкую в процессе модернизации СДСГ [1–10].

Таким образом, целью настоящей работы является разработка методики выбора площадки для размещения элементов СДСГ с использованием многокритериального подхода, основанного на экспертной оценке [11, 12].

## МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадки СДСГ на основе экспертных оценок включает несколько этапов:

**Выбор ЛПР.** При сравнении вариантов площадок число ЛПР выбирается равным или больше числа критериальных свойств (КС). Ориентировочное число ЛПР может быть от 5 до 10 человек.

**Формулировка и выбор КС.** Экспертным составом формируется перечень КС [13–14]. В зависимости от уровня знаний экспертного состава, объединяя КС по смыслу, можно добиться некоторого ограничения их числа. Допускается от 3 до 7 КС.

**Определение весомостей КС.** Для определения весомостей КС применяют, как правило, метод непосредственной оценки,

метод ранговой корреляции, метод последовательных сопоставлений, метод модификации частичного и парного сравнения и т. д. [15, 16]. Однако на ранних стадиях проектирования энергообъектов наиболее часто используется метод ранговой корреляции [17].

ЛПР присваивают оценочный ранг  $a_i$  каждому КС, соответствующему месту, занимаемому КС в порядке убывания его весомости (важности). КС присваивается ранг, отвечающий среднему из суммы соответствующих мест, если невозможно различить несколько КС по их важности [15, 16].

Весомость:  $v_{ij}$ -го КС определяется:

$$v_i = w_i (\sum_{i=1}^n w_i)^{-1}; \quad (1)$$

$$w_i = 1 - A_i (nN)^{-1} + n^{-1}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество ЛПР;  $n$  – количество КС;  $A_i$  – сумма рангов  $i$ -го КС.

$$A_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, \quad (3)$$

где  $a_{ik}$  – ранг, присвоенный  $k$ -м ЛПР.

Степень согласованности мнений ЛПР с ранжированием совокупности КС характеризуется коэффициентом конкордации  $C$  [18].

При отсутствии связанных рангов коэффициент конкордации

$$C = \frac{12\Delta A_\Sigma}{N^2(n^3 - n)};$$

$$\Delta A_\Sigma = \sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2; \quad (4)$$

$$\Delta A_i = A_i - A_{cp};$$

$$\Delta A_{cp} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N a_{ik}}$$

При наличии связанных рангов коэффициент конкордации

$$C = \frac{\Delta A_\Sigma}{\frac{1}{12} N^2 (n^3 - n) - N \sum_{k=1}^N T_k}, \quad (5)$$

где  $T_k = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^m (t_k^3 - t_k)$  – показатель связан-

ных рангов у  $k$ -го ЛПР;  $m$  – количество связанных рангов;  $t_k$  – количество повторений каждого ранга в  $k$ -м ряду;  $m < n$ .

Для оценки значимости коэффициента конкордации вычисляется квантиль распределения  $\chi_c^2$ .

При отсутствии связанных рангов

$$\chi_c^2 = \frac{A_\Sigma}{\frac{1}{12} N n (n+1)}. \quad (6)$$

При наличии связанных рангов

$$\chi_c^2 = \frac{\Delta A_\Sigma}{\frac{1}{12} N n (n+1) - \frac{1}{(n-1)} N \sum_{k=1}^n T_k}. \quad (7)$$

Связи между ранжированием объектов у различных ЛПР не существует при  $C = 0$ , соответственно, все ЛПР одинаково ранжируют объект при  $C = 1$  [16, 17].

При числе степеней свободы  $r$  и уровне значимости  $\alpha$ , как правило,  $\alpha = 0,05$ ,  $r = n - 1$ , производится расчет квантиля распределения. Коэффициент согласия считается значимым, и мнения ЛПР не расходятся при  $\chi_c^2 \geq \chi_{табл}^2$  [18].

Относительные оценки эффективности КС  $e_{ij}$  при отсутствии численных показателей  $y_i$  получают ранжированием вариантов площадки каждым ЛПР.

Сумма рангов

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N b_{ijk}. \quad (8)$$

Эффективность  $e_{ij}$  КС – для каждого варианта:

$$e_{ij} = 1 - B_{ij} (mN)^{-1} + m^{-1}, \quad (9)$$

где  $m$  – количество вариантов.

**Расчет эффективности вариантов по критериальным свойствам.** Для расчета ЛПР необходимо выбрать способы оценок показателей, которым необходимо подобрать численный показатель [15].

Для определения оценок можно использовать экономические и технические расчеты, а в случаях, когда по какому-либо КС не удается подобрать численный показатель –

применить индивидуальный или коллективный опыт ЛПР. Переход численных оценок КС в относительные оценки  $y_i$  в диапазоне  $[0;1]$  может быть осуществлен с помощью линейного преобразования [18]:

$$\begin{aligned}
 & 0 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\
 & e_i = \frac{y_i - y_i^H}{y_i^B - y_i^H} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\
 & 1 \text{ при } y_i \geq y_i^B \\
 & \text{или} \\
 & 1 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\
 & e_i = \frac{y_i^B - y_i}{y_i^B - y_i^H} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\
 & 0 \text{ при } y_i \geq y_i^B.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Диапазон возможных значений показателей в одном из четырех видов  $[0, y_i^B], [y_i^H, y_i^B], [y_i^H, \infty], [0, \infty]$  задается верхними и нижними границами и вводится функциональное преобразование, приводящее отрезок  $[y_i^H, y_i^B]$  к  $[0;1]$ . Диапазон изменений КС устанавливается на экспертной основе.

**Комплексная оценка эффективности вариантов решений** заключается в свертке всех КС в единый комплексный критерий эффективности.

На сегодняшний день в квалиметрии разработано несколько десятков форм свертки  $E_k^*$  для целевой функции [16]. Средняя арифметическая линейная форма используется в способах оценок в интервале  $[0;1]$ . При этом весовости КС не должны зависеть от оценок степени достижения частных целей для любых сравниваемых вариантов или объектов [19]:

$$E_A^* = \sum_{i=1}^n v_i e_i \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \tag{11}$$

Мультипликативная средняя геометрическая форма свертки дополнена коэффициентом «вето» для того, чтобы она обращалась в нуль при нижнем уровне одного из КС:

$$E_M^* = \prod_{i=1}^n (e_i)^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \tag{12}$$

Средняя гармоническая форма свертки:

$$E_T^* = \left( \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_i} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \tag{13}$$

Полученное значение целевой функции  $E_k^*$  для каждого варианта размещения площадки СДСГ представляет комплексную оценку его качества и дает возможность упорядочить варианты по их эффективности. Неэффективному варианту площадки соответствует значение  $E_k^* = 0$ , а идеальному –  $E_k^* = 1$ . Требуемое нормирование диапазона  $E_k^*$  должно обеспечиваться структурой целевой функции и соответствующим масштабированием весовых коэффициентов [18].

В качестве оптимального варианта площадки для размещения элементов СДСГ считается тот, у которого наибольшая оценка эффективности по выражениям (11)–(13).

Погрешность оценок  $v_i$  (в случае определения их группой экспертов) вычисляется по множеству указанных экспертами значений как среднеквадратическое отклонение от среднего. Погрешности оценок  $e_i$  определяются погрешностями измерения показателей  $y_i$  и распределением вероятностей этих погрешностей. При определении  $e_i$  экспертным путем погрешности этих оценок вычисляются аналогично погрешностям оценок  $v_i$ .

При экспертной оценке  $v_i$  и  $e_i$  их среднеквадратическая погрешность снижается пропорционально корню квадратному из числа экспертов. Если считать значения  $v_i$  и  $e_i$  случайными величинами с известными среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_{e_i}$  и  $\sigma_{v_i}$  и средними значениями  $\bar{e}_i$  и  $\bar{v}_i$ , то среднеквадратическая погрешность целевой функции может быть определена в случае отсутствия корреляции между  $v_i$  и  $e_i$  как

$$\sigma_{E^*} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\partial E^*}{\partial e_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \left( \frac{\partial E^*}{\partial v_i} \right)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{1/2}, \tag{14}$$

где черта над частной производной  $\partial E^* / \partial e_i$  означает, что производная вычисляется в точке математического ожидания  $e_i$ ,  $\partial E^* / \partial v_i$  –

в точке математического ожидания  $v_i$ , соответственно.

Из формулы (14) для средней арифметической формы целевой функции (11) получим:

$$\sigma_{E^*}^{ap} = \left\{ \sum_{i=1}^n [v_i^{-2} \sigma_{e_i}^2 + e_i^{-2} \sigma_{v_i}^2] \right\}^{1/2}. \quad (15)$$

Для средней геометрической формы:

$$\sigma_{E^*}^{geom} = E_{geom}^* \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\bar{v}_i}{\bar{e}_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + (\ln \bar{e}_i)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (16)$$

Для средней гармонической формы:

$$\sigma_{E^*}^{гарм} = (E_{geom}^*)^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\bar{v}_i}{\bar{e}_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \frac{\sigma_{v_i}^2}{\bar{e}_i^2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (17)$$

Применение формул (15)–(17) на практике показало, что ошибки  $\sigma_{E^*}$  средней гармонической формы целевой функции значительно меньше, чем у мультипликативной и арифметической форм при тех же самых ошибках в оценках  $v_i$  и  $e_i$ . Таким образом, средняя гармоническая форма (17) обладает большей разрешающей способностью при сравнении близких по своим свойствам объектов с невысокой точностью оценок  $v_i$  и  $e_i$  [14].

Кроме того, средняя гармоническая форма весьма резко занижает оценки целевой функции у вариантов, имеющих низкие показатели по отдельным свойствам [16, 17].

Таким образом, форму (15) можно рекомендовать в качестве показателя эффективности за простоту вычислений и наглядность. Форма (16) также проста для вычислений, совместное применение (15) и (16) позволяет уверенно различать большое число вариантов, включая и те, у которых КС получили одинаковые оценки  $e_{ik}$  [19].

### ВЫБОР ПЛОЩАДКИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ СЕЛА КУНГУРТУГ В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

С помощью методики оценки интенсивности солнечного излучения (СИ) на горизонтальную поверхность, описанной в [19, 20], определены среднегодовые значения интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для изолированных районов Республики Тыва. По результатам расчета, с учетом физико-географических особенностей рельефа местности, произведено районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам (рис. 1).

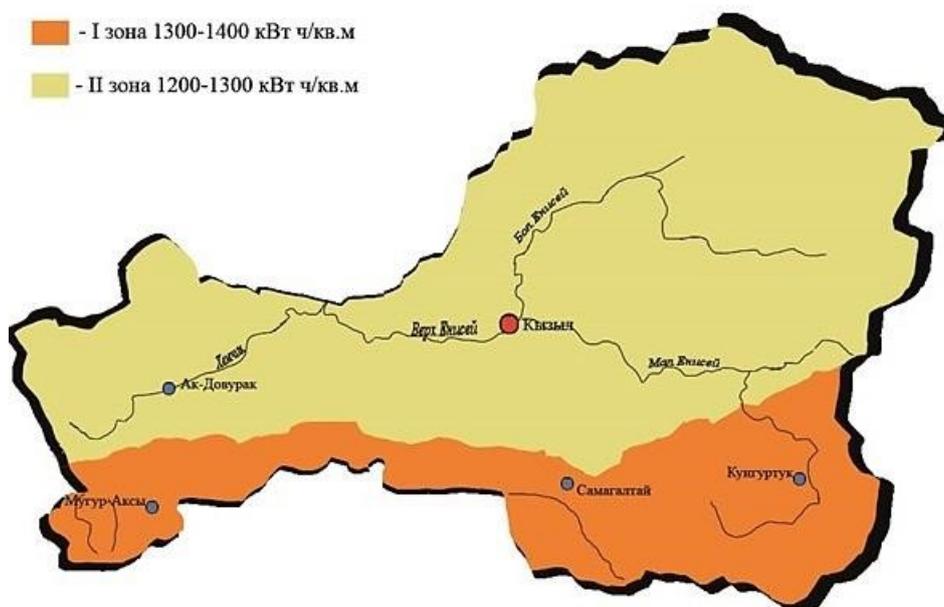


Рис. 1. Районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам  
Fig. 1. Solar zoning of the Tyva Republic

По полученным значениям интенсивности СИ на горизонтальную поверхность Республика Тыва характеризуется двумя солнечными зонами [19, 20]:

**I солнечная зона** со значениями интенсивности СИ на горизонтальную поверхность, равными 1300...1400 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год. Она расположена в основном в южной части республики и характеризуется отсутствием леса, сочетанием тундр и лугов. В зону входят Эрзинский, Монгун-Тайгинский, Тере-Хольский районы.

**II солнечная зона** достаточно благоприятная для использования солнечной энергии, интенсивность СИ на горизонтальную поверхность составляет 1200...1300 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год, расположена в центральной и северной частях республики. К этой зоне относятся Каа-Хемский, Пий-Хемский, Тоджинский районы.

По результатам районирования Республики Тыва по солнечным зонам следует отметить, что для первоочередного размещения СДСГ выбрано изолированное с. Кунгуртуг в Тере-Хольском районе, расположенное в I солнечной зоне. Поэтому выбор площадки

для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации (СДГУ) с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок произведен на примере этого села. Анализ территории вокруг села позволил предложить четыре варианта размещения площадок, представленных на рис. 2:

Вариант № 1 – площадка без лесного массива, расположенная в северной части села и требующая предварительного выравнивания рельефа, с ограниченной возможностью дальнейшего расширения СДСГ.

Вариант № 2 – достаточно ровная площадка без лесного массива с возможностью дальнейшего расширения СДСГ, расположенная в западной части села.

Вариант № 3 – площадка, расположенная в восточной части села и требующая предварительного выравнивания рельефа местности, с возможностью дальнейшего расширения СДСГ при условии вырубке деревьев.

Вариант № 4 – ровная площадка с небольшим лесным массивом, с возможностью дальнейшего расширения СДСГ, расположенная в южной части села.



**Рис. 2. Общий вид с. Кунгуртуг со спутника с вариантами размещения площадок для солнечно-дизельной системы генерации**

**Fig. 2. Satellite general view of Kungurtug village with location options for solar-diesel generation system sites**

**Таблица 1.** Матрица рангов оценки весомостей критериальных свойств [18]  
**Table 1.** Matrix of evaluation ranks of criterion properties strength [18]

Эксперт	Критериальные свойства и их ранги					
	КС 1	КС 2	КС 3	КС 4	КС 5	КС 6
1	1	4,5	4,5	6	3	2
2	1,5	3	1,5	4	6	5
3	2,5	2,5	4	5	6	1
4	2	3	4	6	5	1
5	1	3	2	6	4	5
6	2	4	5	6	3	1
Сумма рангов $A_i$	10	20	21	33	27	15
$v_i$	0,255	0,175	0,167	0,070	0,118	0,215
$A_{cp}$	21					
$\Delta A_i$	-11	-1	0	12	6	-6
$(\Delta A_i)^2$	121	1	0	144	36	36
$\Delta A_{\Sigma}$	338					

КС – критериальные свойства.

Для выбора варианта площадки для размещения элементов СДСГ на основе обобщения имеющегося опыта и опроса шести компетентных экспертов был определен следующий перечень КС, максимум:

- удобства монтажа и обслуживания СДСГ;
- благоприятного рельефа местности и качества грунта;
- удобства компоновки ФЭП;
- воздействия на окружающую среду;
- возможности дальнейшего расширения СДСГ;
- возможности ориентации ФЭП преимущественно на юг и отсутствия высоких препятствий для СИ.

В табл. 1 представлены оценки весомостей КС  $v_i$ , полученные методом ранговой корреляции, и матрица оценочных рангов КС, данных шестью экспертами.

Коэффициент конкордации (согласованности) мнений экспертов  $C = 0,54$  подтвердил согласованность мнений экспертов с ранжированием КС. Для оценки значимости коэффициента конкордации определено значение квантили распределения  $\chi_C^2 = 16,2$  [14]. При числе степеней свободы 5 и уровне значимости  $\alpha = 0,05$  определено табличное значение квантили распределения  $\chi_{C\text{табл}}^2 = 11,1$ . Поскольку  $\chi_C^2 \geq \chi_{C\text{табл}}^2$ , то с достоверностью 95% можно утверждать, что коэффициент согласия значим, и имеет место согласованность

экспертов.

В результате ранжирования вариантов площадок каждым экспертом получены относительные оценки эффективности первого КС:  $e_{11} = 0,812$ ;  $e_{12} = 0,417$ ;  $e_{13} = 0,687$ ;  $e_{14} = 0,583$  (табл. 2).

**Таблица 2.** Матрица рангов для первого критериального свойства  
**Table 2.** Matrix of ranks for the first criterion property

Эксперт	Вариант площадки			
	1	2	3	4
1	1	3	4	2
2	1	4	2	3
3	2,5	2,5	2,5	2,5
4	4	3	1	2
5	1	3,5	2	3,5
6	1	4	2	3

Экспертным путем получены относительные оценки эффективности второго, четвертого и шестого КС. Используя численные оценки длин силовых кабелей, соединяющих ФЭП с инвертором и величины свободных площадей для перспективного расширения, получили относительные оценки эффективности третьего и пятого КС у каждого варианта СДГУ. По формулам линейного преобразования выполнен переход численных показателей в относительные оценки в диапазоне  $[0, 1]$ .

Результаты многокритериальных оценок эффективности вариантов, рассчитанные для среднеарифметической и гармонической форм свертки, приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с. Кунгуртуг

**Table 3.** Multi-criteria assessment of effectiveness of site options for solar-diesel generation system elements location in the village of Kungurtug

№ варианта	Оценки весомостей критериальных свойств						Форма свертки	
	$u_1 = 0,255$	$u_2 = 0,175$	$u_3 = 0,167$	$u_4 = 0,07$	$u_5 = 0,118$	$u_6 = 0,215$		
	Оценка частных критериев $e_{ij}$						$F_{срА}^*$	$F_{Г}^*$
1	0,812	0,687	0,5	0,667	0	0,562	0,578	0
2	0,417	0,812	1	0,729	0,5	0,812	0,700	0,628
3	0,687	0,271	1	0,292	0	0,25	0,464	0
4	0,583	0,729	0	0,812	1	0,625	0,585	0

Анализ результатов сравнения вариантов площадок для размещения элементов СДГУ по многокритериальной оценке, эффективности позволяет выбрать 2-й вариант площадки для с. Кунгуртуг, у которого наибольшие значения многокритериальной оценки  $F_{срА}^*$  и  $F_{Г}^*$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика принятия решений при выборе площадки для размещения эле-

ментов СДГУ с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок, позволяющая учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев. Произведен выбор площадки для размещения элементов СДГУ на основе многокритериального подхода с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок на примере с. Кунгуртуг.

## Список источников

- Lee Amy H. I., Kang He-Yau, Liou You-Jyun. A Hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection // Sustainability. 2017. Vol. 9. No. 2. P. 184. <https://doi.org/10.3390/su9020184>.
- Akkas O. P., Erten M. Ya., Cam E., Inanc N. Optimal site selection for a solar power plant in the central Anatolian region of Turkey // International Journal of Photoenergy. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7452715>.
- Bakhtavar E., Lotfian R. Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2017. Vol. 51. P. 177–183. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2017.232091.594669>.
- Ghasempoura R., Nazari M. A., Ebrahimi M., Ahmadi M. H., Hadiyanto H. Multi-criteria decision making (MCDM) approach for selecting solar plants site and technology: a review // International Journal of Renewable Energy Development. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 15–25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.
- Saracoglu B. O., Ohunakin O. S., Adelekan D. S., Gill J., Atiba O. E., Okokpuje I. P., Atayero A. A. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid // Energy Reports. 2018. Vol. 4. P. 586–602. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.09.002>.
- Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based boolean-fuzzy logic model: a case study of Markazi province, Iran // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 7. P. 1648. <https://doi.org/10.3390/en11071648>.
- Артемьев А. Ю. Методика принятия решений при выборе района для размещения ВЭС с учетом неопределённости в отношении критериальных оценок // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Вып. 46. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2016. С. 98–105.
- Панкратьев П. С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности, с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 320–334. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334>.
- Шакиров В. А., Панкратьев П. С. Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4. С. 141–147.
- Воропай Н. И., Подковальников С. В., Труфанов В. В. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
- Сайфулина К. Э., Козунова Г. Л., Медведев В. А., Рытикова А. М., Чернышев Б. В. Принятие решения в условиях неопределенности: стратегии исследования и использования // Современная зарубежная психология. 2020. Т. 9. № 2. С. 93–106. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090208>.

12. Акоф Р. Л., Сасиени М. В. Основы исследования операций / пер. с англ. В. Я. Алтаева; под ред. И. А. Ушакова. М.: Изд-во «Мир», 1971. 534 с.

13. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Изд-во «Статистика», 1974. 160 с.

14. Хорошев Н. И., Петроченков А. Б., Ромодин А. В. Экспертный метод оценки надежности электротехнического оборудования при принятии управленческих решений // Вестник Ижевского государственного технического университета им. М. Т. Калашникова. 2009. № 4. С. 161–164.

15. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. О квалиметрии. М.: Изд-во стандартов. 1973. 172 с.

16. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / пер. с англ. М.: Изд-во «Радио и связь», 1981. 560 с.

17. Гук Ю. Б., Долгов П. П., О कोरोков В. Р. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике / ред. В. Р. О कोरोкова, Д. С. Щавелева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 176 с.

18. Бобров А. В., Тремясов В. А. Ветро дизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 216 с.

19. Тремясов В. А., Кенден К. В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. 208 с.

20. Кенден К. В. Ресурсы гелиоэнергетики в Республике Тыва // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4. С. 7–13. <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>.

### References

1. Lee Amy H. I., Kang He-Yau, Liou You-Jyun. A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection. *Sustainability*. 2017;9(2):184. <https://doi.org/10.3390/su9020184>.

2. Akkas O. P., Erten M. Ya., Cam E., Inanc N. Optimal site selection for a solar power plant in the central Anatolian region of Turkey. *International Journal of Photoenergy*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7452715>.

3. Bakhtavar E., Lotfian R. Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2017;51:177-183. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2017.232091.594669>.

4. Ghasempoura R., Nazari M. A., Ebrahimi M., Ahmadi M. H., Hadiyanto H. Multi-criteria decision making (MCDM) approach for selecting solar plants site and technology: a review. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2019;8(1):15-25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.

5. Saracoglu B. O., Ohunakin O. S., Adelekan D. S., Gill J., Atiba O. E., Okokpuje I. P., Atayero A. A. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid. *Energy Reports*. 2018;4:586-602. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.09.002>.

6. Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based Boolean-fuzzy logic model: a case study of Markazi province, Iran. *Energies*. 2018;11(7):1648. <https://doi.org/10.3390/en11071648>.

7. Artem'ev A. Yu. Decision-making methodology when choosing wind farm location area considering uncertainty of criterion assessments. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenykh Instituta sistem energetiki imeni L. A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk = System studies in power engineering: proceedings of young scientists of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. Iss. 46. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Acad-

emy of Sciences; 2016, p. 98-105. (In Russ.).

8. Pankratiev P. S. Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multiattribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):320-334. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334>.

9. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. Selection of power plant construction site in conditions of risk using the hierarchy analysis method. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2014;4:141-147. (In Russ.).

10. Voropaj N. I., Podkoval'nikov S. V., Trufanov V. V., et al. *Rationale for electric power system development: methodology, models, methods, their use*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 448 p. (In Russ.).

11. Saifulina K. E., Kozunova G. L., Medvedev V. A., Rytikova A. M., Chernyshev B. V. Decision making under uncertainty: strategies of research and use. *Sovremennaya zarubezhnaya psihologiya = Journal of Modern Foreign Psychology*. 2020;9(2):93-106. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090208>.

12. Ackoff R. L., Sasiени M. W. Fundamentals of operations research, 1971, 534 p. (Russ. ed.: *Osnovy issledovaniya operacij*. Moscow: Mir; 1971, 534 p.)

13. Beshelev S. D., Gurvich F. G. *Mathematical and statistical methods of expert assessments*. Moscow: Statistika; 1974, 160 p. (In Russ.).

14. Khoroshev N. I., Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Expert reliability estimation method of the electrotechnical equipment at administrative decision-making. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M. T. Kalashnikova = Bulletin of Kalashnikov ISTU*. 2009;4:161-164. (In Russ.).

15. Azgal'dov G. G., Rajhman E. P. *About qualimetry*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1973, 172 p. (In Russ.).

16. Keeney R. L., Rife H. Decision making under many criteria: preferences and substitutions, 1981, 560 p.

(Russ. ed.: *Prinyatie reshenij pri mnogih kriteriyah: predpochteniya i zameshcheniya*. Moscow: Radio i svyaz'; 1981, 560 p.)

17. Guk Yu. B., Dolgov P. P., Okorokov V. R. *Integrated analysis of effectiveness of engineering solutions in power engineering* / ed. Okorokova V. R., Shchavaleva D. S. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie; 1985, 176 p. (In Russ.).

18. Bobrov A. V., Tremyasov V. A. *Wind diesel complexes in decentralized power supply*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012, 216 p. (In Russ.).

19. Tremyasov V. A., Kenden K. V. *Photovoltaic and hydropower installations in autonomous power supply systems: Monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, 208 p. (In Russ.).

20. Kenden K. V. Solar energy resources in the Tyva Republic. *Nauchno-tehnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2015;4:7-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Тремясов Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы», Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;

**Григорьева Ольга Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры стандартизации, метрологии и управления качеством, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;

**Кенден Кара-Кыс Вадимовна**, старший преподаватель кафедры общеинженерных дисциплин, Тувинский государственный университет, 667000, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, Россия;

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 13.05.2021; одобрена после рецензирования 23.08.2021; принята к публикации 25.10.2021.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Vladimir A. Tremyasov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Plants and Electric Power Systems, Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;

**Olga A. Grigorieva**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Quality Control, Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;

**Kara-Kys V. Kenden**, Senior Lecturer of the Department of General Engineering Disciplines, Tuvan State University, 36 Lenin St., Kyzyl 667000, Russia;

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 13.05.2021; approved after reviewing 23.08.2021; accepted for publication 25.10.2021.