

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.02

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124



Формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории

© 2026, Х. Арсола-Руис¹, Л.Э. Гарсия-Марреро², М.А. Полухович³✉, В.Р. Мухонго⁴, Ю.В. Логвинова³

¹ Технологический университет Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа», Гавана, Куба

² Университет Салерно, Фишиано, Италия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет Катавала Бвила, Бенгела, Ангола

Аннотация

Исследование посвящено разработке подхода к обеспечению энергоэффективности территории. Целью исследования является моделирование процесса выбора типа и долевого соотношения энергетических установок для различных географических районов территории. Задачи исследования заключались в анализе критериев размещения энергетических установок, в алгоритмизации принятия решения и определении проектных вариантов размещения солнечных и ветряных электростанций. Представлена математическая модель поиска решений для удовлетворения потребителей энергии требуемой мощностью на заданной территории. Оптимальное решение по выбору энергетических установок осуществляется с использованием расстояния Чебышева. Определены критерии эффективности, позволяющие сформулировать требования к проектным решениям при проектировании системы энергоснабжения. Установлен набор данных, который корректируется лицом, принимающим решение, для достижения компромисса между показателями энергоэффективности. Разработан алгоритм поиска оптимального решения при выборе энергетических установок с учётом введённых ограничений. Сформирован комплекс критериев рационального использования возобновляемых ресурсов территории с выбором типа и количества энергетических установок (солнечные панели, ветрогенераторы или их гибридные варианты). Представлены результаты моделирования использования возобновляемых источников энергии в различных зонах территории с учётом различных факторов (интенсивность солнечного излучения, скорость ветра и др.).

Ключевые слова: принятие решений, энергоэффективность территории, ветрогенератор, солнечная панель, возобновляемый ресурс.

Цитирование: Арсола-Руис Х., Гарсия-Марреро Л.Э., Полухович М.А., Мухонго В.Р., Логвинова Ю.В. Формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.111-124. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2025-673 от 20.08.2025.

Вклад авторов: Арсола-Руис Х. – разработка концепции исследования; Гарсия-Марреро Л.Э. – построение математических моделей; Полухович М.А. – обзор релевантных работ; Мухонго В.Р. – моделирование задачи оптимального выбора энергетических объектов; Логвинова Ю.В. – обработка полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Промышленное развитие способствует увеличению энергоёмкости сырьевых отраслей в связи с экстремальными климатическими условиями и огромной территорией ряда государств [1]. Поэтому актуальна проблема обеспечения потребителей устойчивым электропитанием [2]. Это обусловлено изношенностью элементов электроэнергетических комплексов и воздействием экстремальных климатических условий, приводящих к перебоям в передаче электроэнергии [3, 4]. Истощение запасов невозобновляемых природных ресурсов приводит к необходимости применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ): солнечный свет, потоки воды и воздуха, геотермальное тепло [5, 6]. Широко распространено применение ветроэнергетических и фотоэлектрических установок в связи с их относительной простотой эксплуатации и возможностью повсеместного использования [7, 8], но существует проблема формирования решения по их рациональному размещению на территории [9].

Постоянное электроснабжение объектов территории вне зависимости от состояния традиционной электроэнергетической системы и с целью снижения ущерба окружающей среде при использовании ископаемых ресурсов может обеспечиваться гибридной системой ВИЭ, представляющей собой комбинацию совместно работающих источников энергии. В таких системах обычно используют ВИЭ (солнечные панели, ветрогенераторы) и резервные источники (дизель-генераторы, аккумуляторы), что позволяет снизить зависимость от традиционного топлива, уменьшить затраты и обеспечить непрерывное энергоснабжение.

Системы принятия решений включают большое количество подсистем [10]. Оптимизационные задачи становятся большими, а процесс формирования решения – затратным даже для суперкомпьютеров [11]. Декомпозиция систем вызвана тем, что анализ всех элементов и взаимодействий между ними перегружает процесс обработки информации [12].

Решения по выбору и размещению энергетических установок (ЭУ) должны учитывать характеристики территории, климатические условия, потребность промышленных производств и населения в электроэнергии. При этом необходимо отметить слабую структурированность данных характеристик [13].

Целью исследования является разработка подхода к формированию решений при выборе ЭУ для удовлетворения территориальных потребностей.

1 Критерии размещения энергетических установок

Задача функционального зонирования территории с учётом размещения ЭУ включена в стратегию территориального развития (ТР), которая направлена на формирование промышленной, сельскохозяйственной и сервисной отраслей [14], включая сети дорог, водоснабжения, связи, энергоснабжения, водораспределения и т.п. для каждого из районов, составляющих территорию, а также с учётом потребностей близлежащих территорий. На рисунке 1 представлен набор компонентов системы ТР. ТР касается всех секторов экономики и должно корректироваться в каждом временном разрезе (годовом, квартальном, ежемесячном и оперативном), а также при декомпозиции по функциям производственной деятельности [15]. Схема согласования секторов происходит для каждой зоны, как показано на рисунке 2.

В перечень мероприятий ТР входит планирование расположения энергетических сетей по всей территории. Планирование учитывает наличие ресурсов и энергетические потребности, определяемые программами экономического и социального развития территории. При выборе ЭУ, в т.ч. для производства энергии с использованием различных ресурсов для удовлетворения спроса, необходима разбивка по зонам, видам источников энергии и целям.

Изучение характеристик территории позволяет определить потребности в энергии, которые необходимо удовлетворить в течение различных временных периодов [16]. Этот анализ

направлен на выявление связей, называемых координационными переменными, между изучаемой и более крупной энергетическими системами.



Рисунок 1 – Набор компонентов системы территориального развития

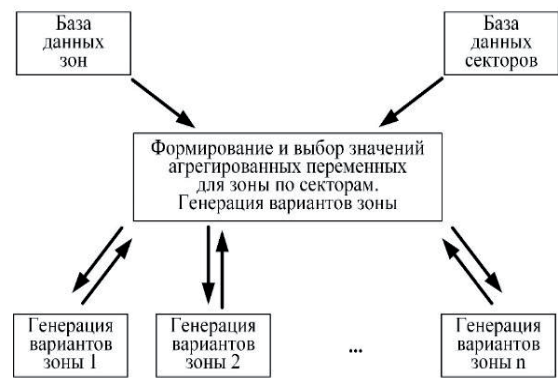


Рисунок 2 – Схема согласования секторов для каждой зоны

В данном исследовании координационными переменными являются следующие:

- максимальная мощность, необходимая для всей территории и для каждой её зоны;
- потенциал доступных на местном уровне ВИЭ.

Например, размещение ВИЭ на территории Республики Куба зависит от ряда факторов.

1. Распределение скорости ветра по территории. Во время сухого сезона, длящегося с ноября по апрель, средняя скорость ветра равна 7,5 м/с, во время влажного сезона – 6,2 м/с. Влияние оказывает орография местности, например, присутствует эффект ускорения ветра в прибрежных зонах.

2. Направление ветра. Преобладающее направление пассатов – северо-восточное с вероятностью 60-70%. Муссоны, наблюдаемые с июля по октябрь, имеют направление южно-западное с вероятностью 20-30%.

3. Экстремальные погодные явления. На территории Кубы возможно возникновение урагана.

С учётом указанных факторов может осуществляться выбор типа турбины ветрогенератора (ВГ) в зависимости от средней скорости ветра, замена ВГ на солнечные панели (СП) при средней скорости ветра меньше 4 м/с (состояние атмосферы, приближенное к штилю) или больше 25 м/с (состояние атмосферы, приближенное к штормовым условиям).

Предусмотрена коррекция коэффициентов на основе метеорологических условий рассматриваемого участка территории:

$$\alpha(t) = \begin{cases} k_1, & \text{сухой сезон (ноябрь-апрель),} \\ k_2, & \text{влажный сезон (май-октябрь),} \end{cases}$$

где $\alpha(t)$ – весовой коэффициент, отражающий долю СП в общем количестве ВИЭ при удовлетворении ограничения $\alpha(t) = 1 - \beta(t)$, где $\beta(t)$ – весовой коэффициент, отражающий долю ВГ в общем количестве ВИЭ.

2 Концептуальная математическая модель выбора энергетических установок

Для формирования решения по выбору ЭУ необходимо построить математические модели, описывающие мощность, генерируемую ВИЭ (СП и ВГ).

Причинами применения СП на территории Кубы являются: равномерное распределение солнечной энергии в течение дня; минимальные требования к инфраструктуре при установке и эксплуатации; низкие эксплуатационные расходы, в т.ч. из-за отсутствия подвижных частей; высокий срок эксплуатации (более 25 лет).

Причинами применения ВГ на территории Кубы являются: возможность генерации больших объёмов энергии; возможность эксплуатации в тёмное время суток; возможность эксплуатации в широком диапазоне погодных условий; возможность создания крупных ветропарков.

Удельная мощность ветрового потока $E_{ВГуд.}$ со средней скоростью v через единичную площадь определяются по формуле [17]: $E_{ВГуд.} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3$, где ρ – плотность воздуха, равная $1,225 \text{ кг/м}^3$; v – средняя скорость потока ветра, м/с.

Для СП известно, что каждое повышение температуры поверхности солнечного модуля на 1°C по сравнению со стандартной температурой, равной 25°C , приводит к снижению его коэффициента полезного действия (КПД) на $0,5\%$ [18].

Влияние температуры на эффективность СП можно проанализировать с помощью следующего выражения [19]: $\eta_{СП_0} = \eta_{СП^*} (1 - \beta^* \cdot (T_{СП} - T^*))$, где $\eta_{СП_0}$ – КПД СП при температуре окружающей среды; $\eta_{СП^*}$ – КПД СП для рассматриваемой модели; β^* – коэффициент температуры для эффективности ячейки (обычно $0,004 \dots 0,005^\circ\text{C}$); $T_{СП}$ – температура поверхности СП; T^* – эталонная температура (25°C).

Мощность, генерируемая СП, может быть выражена в следующем виде: $E_{СП}(x, y, t) = G(x, y, t) \cdot A_{СП} \cdot \eta_{СП}$, где G – интенсивность солнечного излучения на заданном участке территории, Вт/м^2 ; $A_{СП}$ – общая площадь СП на рассматриваемом участке территории, м^2 ; $\eta_{СП}$ – КПД СП; x и y – географические координаты территории; t – время.

КПД СП, кроме температуры, зависит от облачности: $\eta_{СП} = f_{СП} \cdot \eta_{СП_0}$, где $f_{СП}$ – коэффициент, показывающий долю КПД от исходного значения в зависимости от облачности (C). Установлены следующие значения $f_{СП}$ [20, 21]: если $C \leq 50\%$, то $f_{СП} = 1$; если $50 < C \leq 70\%$, то $f_{СП} = 0,5$; если $70 < C \leq 90\%$, то $f_{СП} = 0,3$; если $90 < C \leq 100\%$, то $f_{СП} = 0,1$.

Мощность, генерируемая ВГ, может быть выражена в следующем виде: $E_{ВГ}(x, y, t) = 0,5 \cdot \rho \cdot v(x, y, t)^3 \cdot \eta_{ВГ} \cdot A_{ВГ} \cdot k$, где $\eta_{ВГ}$ – КПД ВГ; $A_{ВГ}$ – общая площадь роторов ВГ на рассматриваемом участке территории, м^2 ; k – $0,998^1$ (корректировка на климатический тренд). КПД ВГ зависит от скорости ветра: $\eta_{ВГ} = f_{ВГ} \cdot \eta_{ВГ_0}$, где $f_{ВГ}$ – коэффициент, показывающий долю КПД от исходного значения в зависимости от значения скорости ветра (v , м/с).

Установлены следующие значения $f_{ВГ}$ [22]: если $v \geq 4$, то $f_{ВГ} = 1$; если $3 \leq v < 4$, то $f_{ВГ} = 0,5$; если $2 \leq v < 3$, то $f_{ВГ} = 0,3$; если $v < 2$, то $f_{ВГ} = 0,1$.

Площадь ротора ВГ с горизонтальной осью вращения: $A_{ВГ} = \frac{\pi D^2}{4}$, где D – диаметр ветроколеса, м.

Модель для выбора оптимальной системы ВИЭ может быть представлена в следующем виде: $E_{ВИЭ}(x, y, z) = \alpha \cdot E_{СП}(x, y, t) + \beta \cdot E_{ВГ}(x, y, t)$, где $\alpha, \beta \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты (зависят от приоритетов системы электроснабжения); z – критерии эффективности.

Функция полезности задаётся расстоянием Чебышева как разность значений рассчитанных показателей мощности, генерируемой ВИЭ, и нормированных идеальных значений, то есть требуется минимизировать расстояние Чебышева до желаемых показателей:

$$E_{ВИЭ} = \min_{x \in X} \max_{i=1, \dots, n} \left[\left| E_{СП_i} - E_{СП_i}^* \right|, \left| E_{ВГ_i} - E_{ВГ_i}^* \right| \right], \quad (1)$$

где X – множество возможных решений; n – количество вариаций $E_{СП}$, $E_{ВГ}$; $E_{СП} = (E_{СП1}, E_{СП2}, \dots, E_{СПn})$, $E_{ВГ} = (E_{ВГ1}, E_{ВГ2}, \dots, E_{ВГn})$ – вариации мощностей, генерируемых солнечной и ветровой подсистемами системы ВИЭ для удовлетворения потребностей объектов, соответственно; $E_{СП}^*$, $E_{ВГ}^*$ – требуемые мощности, генерируемые солнечной и ветровой подсистемами системы ВИЭ для удовлетворения потребностей объектов, соответственно. Задача сводится к

¹ По данным *NASA GISS* (<https://www.giss.nasa.gov/>) наблюдается снижение средней скорости ветра на $0,2\%$ в год за 1980 – 2020 гг. Соответственно, необходима корректировка математической модели путём введения коэффициента для учёта данного тренда.

поиску таких значений $E_{СП}$, $E_{ВГ}$, при которых наибольшее отклонение по любой вариации минимально.

Критерий решения для оптимального размещения ВИЭ представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} \text{Выбор солнечной панели, если } C < 0,5; \\ \text{Выбор ветрогенератора, если } v > 4; \\ \text{Гибридная система, иначе.} \end{cases}$$

3 Пример для Республики Куба

Электроэнергетическая система представляет собой комбинацию подсистем теплоэлектростанций и ВИЭ. Периодически возникает необходимость восполнения дефицита электроэнергии путём использования ВИЭ. Перебором вариантов формируется оптимальное решение по использованию в подсистеме ВИЭ того или иного вида ВИЭ или её гибридного варианта. Гибридные подсистемы, хотя и обеспечивают более стабильное энергоснабжение, требуют больших начальных инвестиций и более сложного технического обслуживания. Выбор между СП, ВГ или гибридной системой зависит от ряда факторов. Куба расположена в тропическом климатическом поясе, где высокий уровень солнечного излучения сохраняется в течение всего года, что обуславливает выбор в пользу СП как эффективного источника энергии. При этом остров подвержен пассатным ветрам, что создаёт хорошие условия для использования ВГ. Распределение ветровых ресурсов может быть неравномерным по территории острова. Территория Республики Куба условно поделена на четыре зоны (рисунок 3). Для анализа территории с целью выбора наиболее подходящего ВИЭ используется пространственно-временная сетка с разрешением 10×10 км, временной шаг – 3 часа.

Для моделирования задачи выбрано по одной ячейке в каждой зоне (ячейки с чёрной заливкой на рисунках 4, 5). Метеорологическими параметрами каждой ячейки являются: интенсивность солнечного излучения (G , Вт/м²); скорость ветра (v , м/с); облачность (C , %); температура воздуха (T , °С). Необходимые параметры для ячейки получены при помощи инструмента для визуализации прогнозов погоды «Windy» - <https://www.windy.com/> (рисунки 4-5, таблица 1).

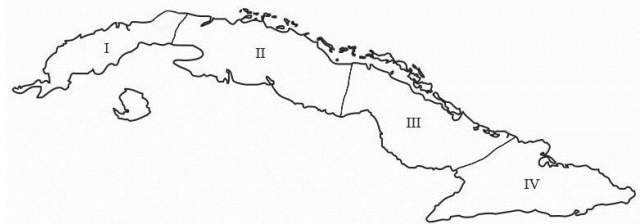


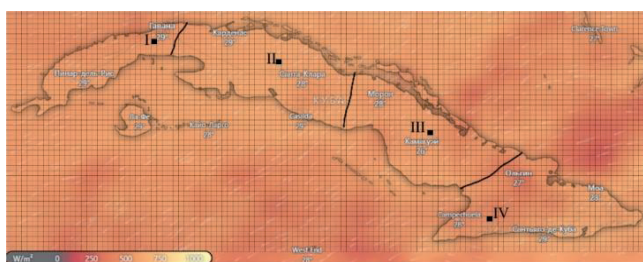
Рисунок 3 – Схема деления Республики Куба на зоны

Схема алгоритма формирования решений при выборе ЭУ представлена на рисунке 6.

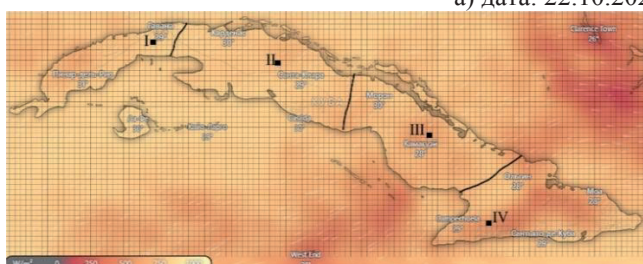
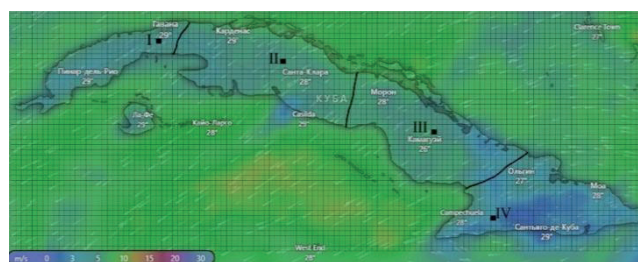
Рассмотрены условия задачи, когда для отмеченных ячеек в зонах требуется, чтобы мощность электроэнергии, генерируемой ВИЭ, составляла 80 кВт. Пусть $E_{СП}^*$ и $E_{ВГ}^*$ равны 80 кВт, а в связи с погодными условиями может отсутствовать один из рассматриваемых ресурсов. В качестве примера приведён расчёт $E_{СП}$ и $E_{ВГ}$ для ячейки зоны I, которая характеризуется следующими метеорологическими параметрами: интенсивность солнечного излучения 520 Вт/м²; средняя скорость ветра 4,8 м/с; облачность 15 %.

На основе приведённых данных произведён расчёт мощностей, генерируемых подсистемами ВИЭ для ячейки зоны I по вышеприведённым формулам на 22.10.2025 в 11:00:

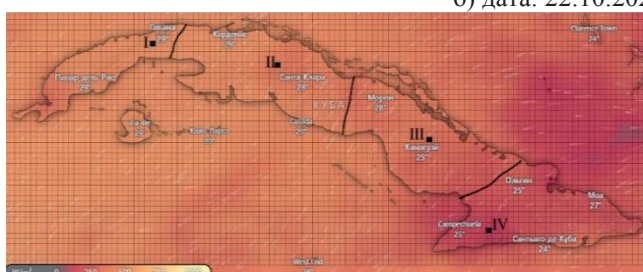
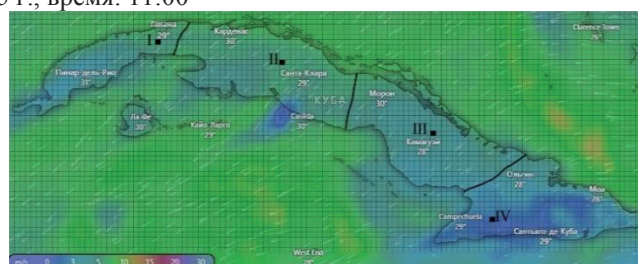
$$\begin{aligned} \eta_{СП} &= 1 \cdot 0,2 \cdot (1 - 0,005 \cdot (29 - 25)) = 0,196; \quad \eta_{ВГ} = 1 \cdot 0,3 = 0,3; \\ E_{СП} &= 650 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot 1000 \text{ м}^2 \cdot 0,196 = 101,9 \text{ кВт}; \\ E_{ВГ} &= 0,5 \cdot 1,225 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot (4,8 \text{ м} / \text{с})^3 \cdot 0,3 \cdot 1500 \text{ м}^2 = 30,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$



а) дата: 22.10.2025 г., время: 11:00



б) дата: 22.10.2025 г., время: 14:00



в) дата: 22.10.2025 г., время: 17:00

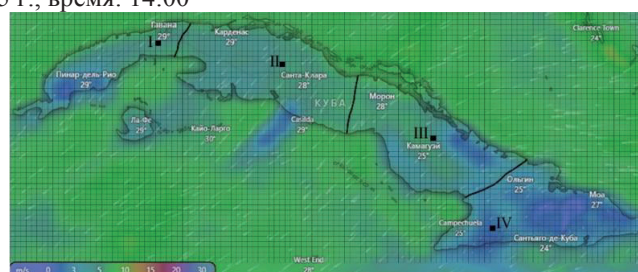


Рисунок 4 – Отображение распределения интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха на территории Кубы с интервалом времени 3 часа

Рисунок 5 – Отображение распределения скорости ветра и температуры окружающего воздуха на территории Кубы с интервалом времени 3 часа

Таблица 1 – Метеорологические параметры ячеек, полученные при помощи портала «Windy»

Но- мер зоны	22.10.2025 11:00				22.10.2025 14:00				22.10.2025 17:00			
	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %
I	520	29	4,8	15	800	29	5,1	2	500	29	4,8	2
II	600	28	4,8	28	740	28	5	32	270	28	5	45
III	570	26	5,1	76	650	26	4	99	270	26	4	56
IV	490	28	3	53	520	28	1,8	97	100	28	1,5	80

Результаты расчёта для всех ячеек приведены в таблице 2.

Для подбора оптимальных значений α и β на основе минимизации расстояния Чебышева (1) написан скрипт в *Matlab* (см. рисунок 7). Результаты расчётов с применением скрипта для выбранных ячеек рассматриваемых зон приведены в таблице 3.

На основе полученных результатов построена карта с распределением подсистем ВИЭ на территории Кубы в разные временные периоды (рисунок 8).

В ячейке зоны IV наиболее предпочтительным ВИЭ для восполнения дефицита энергии являются СП во все рассмотренные временные периоды. В ячейках остальных зон предпочтение отдаётся либо гибридным системам, либо одному из доступных видов ЭУ.

Анализ полученных результатов показал, что использование одного вида ВИЭ при наблюдаемых метеорологических условиях может не обеспечить требуемую мощность.

В таких случаях целесообразно использовать мощность ВИЭ, размещённых в соседних ячейках, где в этот же период времени могут наблюдаться метеорологические условия, способствующие генерации большей мощности ВИЭ.

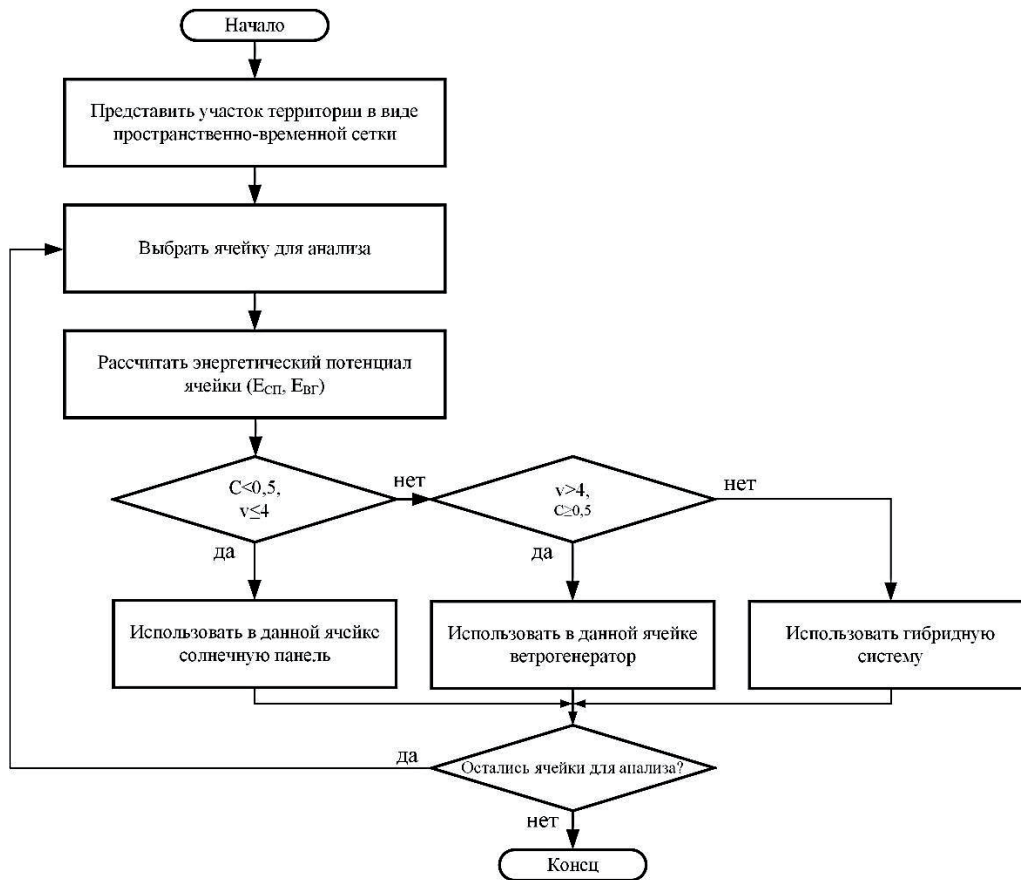


Рисунок 6 – Схема алгоритма формирования решений при выборе энергетических установок

Таблица 2 – Результаты расчёта мощностей, генерируемых солнечной и ветровой подсистемами электроэнергетической системы

Номер зоны	$f_{СП}$	$\eta_{СП}$	$E_{СП}, кВт$	$f_{ВГ}$	$\eta_{ВГ}$	$E_{ВГ}, кВт$
22.10.2025 11:00						
I	1	0,196	101,9	1	0,3	30,5
II	1	0,197	118,2	1	0,3	30,5
III	0,3	0,0597	34,0	1	0,3	36,6
IV	0,5	0,0985	48,3	0,5	0,15	3,7
22.10.2025 14:00						
I	1	0,196	156,8	1	0,3	36,6
II	1	0,197	145,8	1	0,3	34,5
III	0,1	0,0199	12,9	1	0,3	17,6
IV	0,1	0,0197	10,2	0,1	0,03	0,2
22.10.2025 17:00						
I	1	0,196	98,0	1	0,3	30,5
II	1	0,197	53,2	1	0,3	34,5
III	0,5	0,0995	26,9	1	0,3	17,6
IV	0,3	0,0591	5,9	0,1	0,03	0,1

```

>> % Исходные данные
E_target = 80;           % Требуемая мощность ВИЭ
Esp_star = 80;          % Требуемая мощность СП
Evh_star = 80;          % Требуемая мощность ВГ
Esp = 101.9;            % Существующая мощность СП
Evh = 30.5;             % Существующая мощность ВГ
C = 0.15;               % Облачность
v = 4.8;                % Скорость ветра

% Инициализация оптимальных значений
optimal_alpha = NaN;
optimal_beta = NaN;
best_error = Inf;       % Хранит минимальное найденное отклонение

% Проверка специальных случаев
if C < 0.5 && v <= 4
    % Используется только ЕСП
    E = Esp;
    optimal_alpha = 1;   % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕСП
    optimal_beta = 0;
    disp('Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕСП');
elseif v > 4 && C >= 0.5
    % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ
    E = Evh;
    optimal_alpha = 0;   % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ
    optimal_beta = 1;
    disp('Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ');
else
    % Подбираем оптимальное сочетание для достижения значения E_target
    alpha_range = linspace(0, 1, 1000); % Возможные значения альфа

    % Рассматриваем возможные значения альфа
    for i = 1:length(alpha_range)
        alpha = alpha_range(i);
        beta = 1 - alpha;           % Так как поставлено условие « $\alpha + \beta = 1$ »
        E_current = alpha * Esp + beta * Evh;

        % Оцениваем отклонение от цели
        error = abs(E_current - E_target);

        % Выбираем наилучшее решение
        if error < best_error
            best_error = error;
            optimal_alpha = alpha;
            optimal_beta = beta;
            E = E_current;
        end
    end
end

% Выводим результат
fprintf('Оптимальные коэффициенты:\n');
fprintf('Альфа ( $\alpha$ ): %.4f\n', optimal_alpha);
fprintf('Бета ( $\beta$ ): %.4f\n', optimal_beta);
fprintf('Итоговая мощность: %.4f\n', E);

```

Рисунок 7 – Скрипт для подбора оптимальных значений α и β (Matlab)

Для детальной проработки оптимального решения необходимо учитывать следующее: стоимость установки и обслуживания каждого типа ВИЭ; доступность ресурсов (солнечной энергии и ветра) в разных регионах Кубы; текущую энергетическую инфраструктуру и потребности в энергии.

Выбор только одного вида ВИЭ по сравнению с использованием гибридной системы обусловлен рядом преимуществ:

- внедрение одной технологии может быть менее капиталоемким на начальном этапе;
- стоимость закупки и обслуживания одного вида ЭУ может быть ниже в зависимости от выбранного региона и условий эксплуатации;
- ЭУ на основе одного типа энергии могут быть проще в обслуживании;
- для ремонта и обслуживания гибридных систем требуются специалисты широкого профиля;
- в разных регионах территории может быть предпочтительно использование определенных типов ВИЭ;
- выбор одной технологии может зависеть от специфики энергопотребления в различных частях острова.

Начав с одного вида ВИЭ, можно поэтапно наращивать мощности, прежде чем переходить к более сложным гибридным системам. Это позволяет гибко подходить к распределению ресурсов и корректировать стратегию развития энергетики в зависимости от полученных результатов. Гибридные подсистемы, обеспечивая стабильное энергообеспечение, зависят от корректной работы всех компонентов. Отказ одного из источников энергии в гибридной подсистеме может потребовать сложных решений для поддержания работы системы в целом.

Таблица 3 – Результаты формирования решения при выборе энергетических установок

Номер зоны	α	β	$E_{ВИЭ}$, кВт	Рекомендуемая подсистема ВИЭ
22.10.2025 11:00				
I	0,69	0,31	80,03	Гибридная
II	0,56	0,44	80,01	Гибридная
III	0	1	36,60	Ветрогенераторы
IV	1	0	48,30	Солнечные панели
22.10.2025 14:00				
I	0,36	0,64	80,04	Гибридная
II	0,41	0,59	79,96	Гибридная
III	0	1	17,60	Ветрогенераторы
IV	1	0	10,20	Солнечные панели
22.10.2025 17:00				
I	0,73	0,27	80,03	Гибридная
II	1	0	53,20	Солнечные панели
III	1	0	26,90	Солнечные панели
IV	1	0	5,90	Солнечные панели

Гибридные подсистемы, обеспечивая стабильное энергообеспечение, зависят от корректной работы всех компонентов. Отказ одного из источников энергии в гибридной подсистеме может потребовать сложных решений для поддержания работы системы в целом.

В долгосрочной перспективе гибридные системы могут обеспечить более устойчивое и надёжное энергообеспечение, особенно в условиях изменчивости погодных условий. Поэтому после анализа эффективности отдельных систем можно рассмотреть возможность их комбинирования для создания более устойчивой энергетической инфраструктуры.

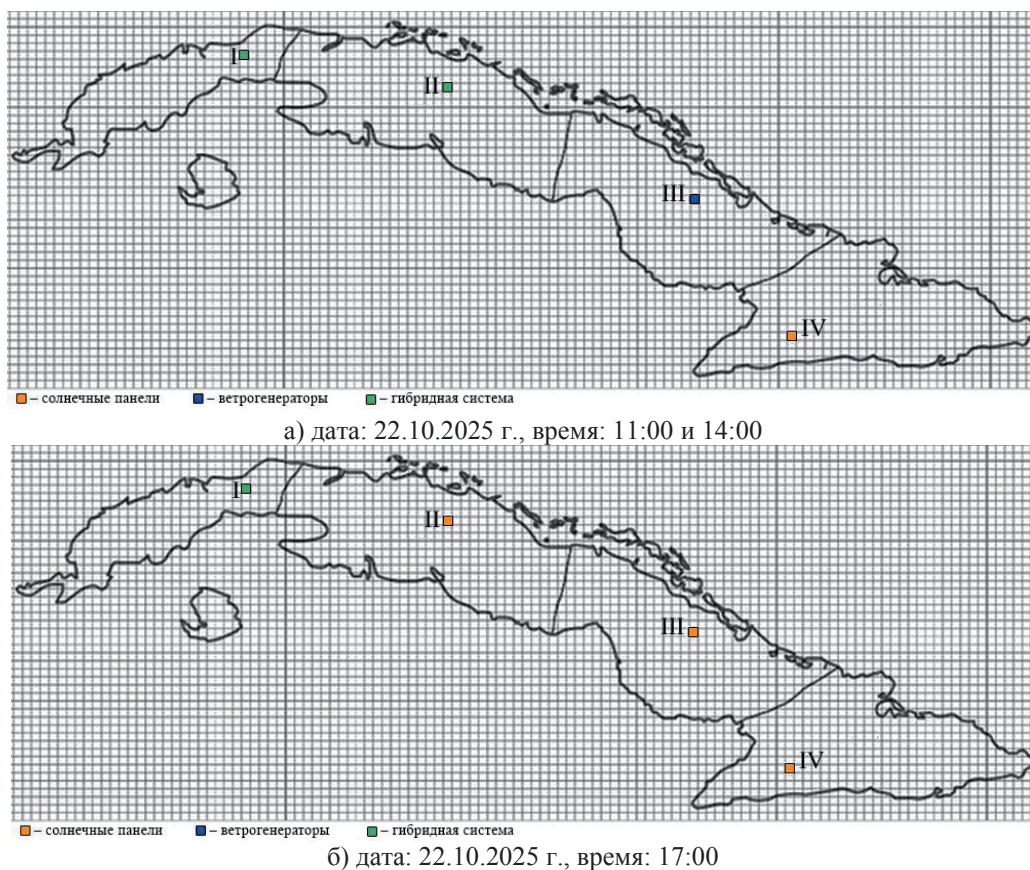


Рисунок 8 – Распределение подсистем ВИЭ на территории Кубы

Заключение

В работе рассмотрены критерии размещения ВИЭ, предложен алгоритм формирования решений при выборе ЭУ, сформулированы проектные предложения по размещению солнечных и ветряных электростанций.

Представленный подход позволяет обоснованно подойти к выбору ЭУ, использующих возобновляемые ресурсы (солнечную энергию и/или ветер), и размещать на местности для повышения ресурсной эффективности территории с учётом удовлетворения территориальных потребностей.

Список источников

- [1] **Соколов М.М.** Как добиться снижения энергоёмкости экономики в России. *Геоэкономика энергетики*. 2022. №4. С.124-151. DOI: 10.48137/26870703_2022_20_4_124.
- [2] **Терентьева А.С., Гайворонская М.С.** Перспективы энергоснабжения регионов России в условиях реализации климатической политики и энергоперехода. *Экономические и социальные проблемы России*. 2025. №1(61). С.65-80. DOI: 10.31249/espr/2025.01.04.
- [3] **Сендеров С., Рабчук В.** Энергетическая безопасность сегодня и основные методики её обеспечения. *Энергетическая политика*. 2022. №11(177). С.56-69. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_11177_56.
- [4] **Булганина Д.А., Семёнова Ю.Е.** Проблема функционирования энергетического комплекса России в условиях экономической турбулентности. *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2022. №8(66). С.11-17. DOI: 10.47581/2022/IE-08/Bulganina.01.
- [5] **Атаев М.Г., Мухамметназаров А.С., Эсенов М.П.** Переход к возобновляемым источникам энергии. *Научный журнал «CETERIS PARIBUS»*. 2024. №10. С.26-28.
- [6] **Любимова Н.Г., Флакман А.С.** Последствия использования возобновляемых источников энергии. *Вестник ГУУ*. 2024. №3. С.95-101. DOI: 10.26425/1816-4277-2024-3-95-101.
- [7] **Байдаров Д.Ю., Григорьев А.С., Лосев О.Г., Сафронова Н.Н., Тутнов И.А.** Перспектива практического применения энергетических установок и комплексов энергоснабжения малой мощности. *Надежность и качество сложных систем*. 2024. №4(48). С.130-139. DOI: 10.21685/2307-4205-2024-4-15.
- [8] **Дзюба А.П., Соловьева И.А., Семиколенов А.В.** Перспективы внедрения активных энергетических комплексов в промышленность России. *Journal of new economy*. 2022. №2. С.80-101. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-2-5.
- [9] **Воронин С.М., Эвиев В.А., Салаев Б.К., Юдаев И.В.** Энергетика Республики Калмыкия. Состояние и перспективы. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. №5(77). С.325-336. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-37.
- [10] **Самойленко В.С., Федотова А.Ю.** Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. №8(146). С.87. DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.10.
- [11] **Дятчина А.В., Олейникова С.А., Недикова Т.Н.** Разработка проблемно-ориентированной системы для решения оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023. №4. С.37-43. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.005.
- [12] **de Weck O., Roos D., Magee C.** *Engineering Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2011. <https://mitpress.mit.edu/9780262529945/engineering-systems/>.
- [13] **Родзин С.И., Боженик А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.** Методы нечёткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2023. №2(232). С.186-200. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [14] **Jebaselvi G.D.A., Paramasivam S.** Analysis on renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. №28. P.625-634. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.07.033.
- [15] **Maheri A.** Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties. *Renewable Energy*. 2014. №6(66). P.650-661. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.009.
- [16] **Ribeiro V., Arzola-Ruiz J., Garcia-Marrero L.E., Oliva-Merencio D.** Modelado matemático para la selección óptima de instalaciones energéticas y su esquema de solución. *Ingeniería Mecánica*. 2018. Vol. 22. №1. P.23-31.
- [17] **Квитко А.В., Хицкова А.О.** Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. №97. С.359-374.

- [18] **Davis M.W., Fanney A.H., Dougherty B.P.** Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2001. №123(3). P.200–210.
- [19] **Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б.** Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счёт снижения температуры поверхности. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. №2. С.489-499.
- [20] **Кубова Р.М., Кубова К.В., Павленко А.А.** Оценка влияния статистических характеристик облачности на инсоляцию фотобатарей. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014. №5(8). С.136-143.
- [21] **Усков А.Е., Буторина Е.О., Беспалов Е.Г.** Потенциал, особенности работы и экономическая эффективность солнечных фотоэлектрических станций. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. №98. С. 342-352.
- [22] **Адилбеков Е.К.** Режим ветра и оценка ветроэнергетического потенциала на территории учебного центра Военного института Сухопутных войск Республики Казахстан. *Гидрометеорология и экология*. 2019. №1(92). С.34-43.

Сведения об авторах



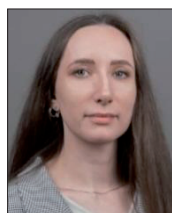
Арсола-Руис Хосе. Окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого в 1971 г., к.т.н. (1982). Профессор кафедры машиностроения факультета машиностроения Технологического университета Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа» (CUJAE). В списке научных трудов более 200 работ в области анализа и синтеза инженерных систем. Author ID (Scopus): 57194702773; ORCID ID: 0000-0002-4101-878X; josearzolaruiz1945@gmail.com.

Гарсия-Марреро Луис Энрике. Окончил Институт технологий и прикладных наук Технологического университета Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа» (CUJAE) в 2016 г., Университет Ольгины в 2020 г. В настоящее время обучается в аспирантуре по направлению «Электротехника» в Парижском университете *CY Cergy* и изучает производство фотоэлектрической энергии в Университете Салерно. В списке научных трудов более 20 работ, посвящённых структурированию данных, алгоритмам, методам оптимизации, машинному обучению и системам возобновляемых источников энергии. Author ID (Scopus): 57226878489; ORCID: 0000-0001-6710-4072; lgarciamarrero@unisa.it.



Полюхович Максим Алексеевич. Окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) в 2018 г., к.т.н. (2023). Доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института СПбПУ. В списке научных трудов более 60 работ в области обеспечения безопасности электроснабжения, системного моделирования, создания систем поддержки принятия решений. Author ID (РИНЦ): 1048304; Author ID (Scopus): 57212553296, ORCID: 0000-0003-2722-5552; Researcher ID (WoS): AAE-1582-2019. polyuhovich_ma@spbstu.ru. ✉

Валенте Рибейро Мухонго. Окончил Астраханский государственный технический университет в 1994 г., к.т.н. (2019). Профессор кафедры механики Политехнического института Университета Катавала Бвила (UKB). Научные труды посвящены анализу и синтезу технических систем, возобновляемой энергетике. ORCID: 0000-0001-8729-6884; varmuhongo@yahoo.com.br.



Логвинова Юлия Валерьевна. Окончила СПбПУ в 2016, к.т.н. (2025). Старший преподаватель Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института СПбПУ. В списке научных трудов более 20 работ в области безопасности труда и оценки профессиональных рисков, моделирования сложных систем. Author ID (РИНЦ): 1026812; Author ID (Scopus): 57210916868; ORCID: 0000-0002-8392-1790; Researcher ID (WoS): F-9934-2019. logvinova_yuv@spbstu.ru.

Поступила в редакцию 28.06.2025, после рецензирования 28.10.2025. Принята к публикации 1.12.2025.



Formation of solutions for selecting energy installations for ensuring territorial energy efficiency

© 2026, J. Arzola-Ruiz¹, L.E. Garcia-Marrero², M.A. Polyukhovich³✉, V.R. Muhongo⁴, Yu.V. Logvinova³

¹ Technological University of Havana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), Havana, Cuba

² University of Salerno, Fisciano, Italy

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

⁴ Katyavala Bwila University, Benguela, Angola

Abstract

The study is devoted to the development of an approach to ensuring the energy efficiency of a territory. The subject of the study is the modeling of the process of selecting the type and proportional composition of energy installations for various geographical areas within a territory. The research tasks included the analysis of criteria for the placement of energy installations, the algorithmization of decision-making, and the identification of design options for the deployment of solar and wind power plants. A mathematical model for searching solutions to meet energy consumers with the required capacity in a given territory is presented. The optimal solution for selecting energy installations is obtained using the Chebyshev distance. Efficiency criteria are defined that make it possible to formulate requirements for design solutions in the planning of an energy supply system. A dataset is identified and adjusted by the decision-maker to achieve a compromise between energy efficiency indicators. An algorithm for finding the optimal solution for the selection of energy installations under the imposed restrictions is developed. A set of criteria for the rational use of the territory's renewable resources is formed, enabling the selection of the type and number of energy installations (solar panels, wind turbines, or their hybrid configurations). The results of modeling the use of renewable energy sources in different territorial, taking into account various factors (solar radiation intensity, wind speed, etc.), are presented.

Keywords: decision-making, territorial energy efficiency, wind turbine, solar panel, renewable resource.

For citation: Arzola-Ruiz J, Garcia-Marrero LE, Polyukhovich MA, Muhongo VR, Logvinova YuV. Formation of solutions for selecting energy installations for ensuring territorial energy efficiency [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 111-124. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124.

Financial Support: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075-15-2025-673 dated August 20, 2025).

Authors' contributions: Arzola-Ruiz J. – development of the research concepts; Garcia-Marrero LE. – development of mathematical models; Polyukhovich MA. – review of relevant studies; Muhongo VR. – modeling of the optimal selection problem for energy facilities; Logvinova YuV. – processing and analysis of the obtained results.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - Set of components of the territorial development system

Figure 2 - Sector coordination scheme for each zone

Figure 3 - Zoning scheme of the Republic of Cuba

Figure 4 - Spatial distribution of solar radiation intensity and ambient air temperature over the territory of Cuba with a 3-hour time interval

Figure 5 - Spatial distribution of wind speed and ambient air temperature over the territory of Cuba with a 3-hour time interval

Figure 6 - Algorithmic scheme for forming solutions in the selection of energy installations

Figure 7 - Script for selecting optimal values of α and β (Matlab)

Figure 8 - Distribution of renewable energy subsystems over the territory of Cuba

Table 1 - Meteorological parameters of grid obtained using the «Windy» portal

Table 2 - Results of calculating the capacities generated by the solar and the wind subsystem of the electric power system

Table 3 - Results of solution formation for the selection of energy installations

References

- [1] **Sokolov MM.** How to achieve a reduction in the energy intensity of the economy in Russia [In Russian]. *Geoeconomics of energy*. 2022; 4: 124-151. DOI: 10.48137/26870703_2022_20_4_124.
- [2] **Terentyeva AS, Gaivoronskaya MS.** Prospects for energy supply to Russian regions in the context of implementing climate policy and energy transition [In Russian]. *ESPR*. 2025; 1(61): 65-80. DOI:10.31249/espr/2025.01.04.
- [3] **Senderov S, Rabchuk V.** Energy security today and the main methods of its provision [In Russian]. *EP*. 2022; 11(177): 56-69. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_11177_56.
- [4] **Bulganina DA, Semenova YuE.** The problem of functioning of the energy complex of Russia in conditions of economic turbulence [In Russian]. *Innovative economy: prospects for development and improvement*. 2022; 8(66): 11-17. DOI: 10.47581/2022/IE-08/Bulganina.01.
- [5] **Atayev MG, Mukhammetnazarov AS, Esenov MP.** Transition to renewable energy sources. [In Russian] *Scientific journal «CETERIS PARIBUS»*. 2024; 10: 26-28.
- [6] **Lyubimova NG, Flaksman AS.** Consequences of using renewable energy sources [In Russian]. *Bulletin of the State University of Management*. 2024; 3: 95-101. DOI:10.26425/1816-4277-2024-3-95-101.
- [7] **Baydarov DYU, Grigoriev AS, Losev OG, Safronova NN, Tutnov IA.** Prospects for the practical application of power plants and low-power energy supply complexes [In Russian]. *NiKSS*. 2024; 4(48): 130-139. DOI:10.21685/2307-4205-2024-4-15.
- [8] **Dzyuba AP, Solovieva IA, Semikolenov AV.** Prospects for the implementation of active energy complexes in Russian industry [In Russian]. *Journal of new economy*. 2022; 2: 80-101. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-2-5.
- [9] **Voronin SM, Eviev VA, Salaev BK, Yudaev IV.** Power engineering of the Republic of Kalmykia. Status and prospects [In Russian]. *Izvestia NV AUK*. 2024; 5(77): 325-336. DOI:10.32786/2071-9485-2024-05-37.
- [10] **Samoylenko VS, Fedotova AYU.** Architecture of an intelligent decision support system [In Russian]. *MNIZH*. 2024; 8(146): 87. DOI:10.60797/IRJ.2024.146.10.
- [11] **Dyatchina AV, Oleynikova SA, Nedikova TN.** Development of a problem-oriented system for solving the optimization problem of managing the flow of incoming applications [In Russian]. *VSTU Bulletin*. 2023; 4: 37-43. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.005.
- [12] **de Weck O, Roos D, Magee C.** *Engineering Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2011.
- [13] **Rodzin SI, Bozhenyuk AV, Kravchenko YuA, Rodzina ON.** Methods of fuzzy multi-criteria group decision making for evacuation problems in emergency situations [In Russian]. *Bulletin of SFedU. Technical sciences*. 2023; 2(232): 186-200. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [14] **Jebaselvi GDA, Paramasivam S.** Analysis on renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 28: 625-634. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.07.033.
- [15] **Maheri A.** Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties. *Renewable Energy*. 2014; 6(66): 650-661. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.009.
- [16] **Ribeiro V, Arzola-Ruiz J, Garcia-Marrero LE, Oliva-Merencio D.** Mathematical modeling for the optimal selection of energy facilities and its solution scheme [In Spanish]. *Mechanical Engineering*. 2018; 22(1): 23-31.
- [17] **Kvitko AV, Khitskova AO.** Wind characteristics, features of resource calculation and economic efficiency of wind energy [In Russian]. *Scientific journal of KubSAU*. 2014; 97: 359-374.
- [18] **Davis MW, Fannery AH, Dougherty BP.** Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2001; 123(3): 200-210.
- [19] **Kirpichnikova IM, Makhsumov IB.** Improving the energy efficiency of solar modules by reducing the surface temperature [In Russian]. *Tula State University Bulletin. Technical Sciences*. 2020; 2: 489-499.
- [20] **Kubova RM, Kubova KV, Pavlenko AA.** Assessing the impact of cloud statistical characteristics on photovoltaic panel insolation. [In Russian] *Educational Resources and Technologies*. 2014; 5(8): 136-143.
- [21] **Uskov AE, Butorina EO, Bepalov EG.** Potential, operational features, and economic efficiency of solar photovoltaic power plants [In Russian]. *Scientific Journal of KubSAU*. 2014; 98: 342-352.
- [22] **Adilbekov EK.** Wind regime and assessment of wind energy potential on the territory of the training center of the Military institute of the Ground forces of the Republic of Kazakhstan [In Russian]. *Hydrometeorology and Ecology*. 2019; 1(92): 34-43.

About the authors

José Arzola-Ruiz graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 1971, PhD in Engineering (1982). He is a Professor of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, José Antonio Echeverría Technological University of Havana (CUJAE). He is the author and a co-author of more than 200 publications in the field of analysis and synthesis of engineering systems. Author ID (Scopus): 57194702773; ORCID: 0000-0002-4101-878X; josearzolaruiz1945@gmail.com.

Luis Enrique Garcia-Marrero graduated from the Institute of Technology and Applied Sciences of the José Antonio Echeverría Technological University of Havana (Havana, Cuba) in 2016 and from the University of Holguín (Holguín, Cuba) in 2020. He is currently a PhD student in Electrical engineering at the CY Cergy Paris University (Cergy-Pontoise, France) and conducting research on photovoltaic energy generation at the University of Salerno (Fisciano, Italy). His list of publications includes more than 20 works devoted to data structuring, algorithms, optimization methods, machine learning, and renewable energy systems. Author ID (Scopus): 57226878489; ORCID: 0000-0001-6710-4072; lgarciamarrero@unisa.it.

Maxim Alekseevich Polyukhovich graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 2018, PhD in Engineering (2023). He is an Associate professor at the Higher School of Technosphere Safety, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. He is the author and a co-author of more than 60 publications in the field of power supply safety, system modeling, and decision support system development. Author ID (РИИЦ): 1048304; Author ID (Scopus): 57212553296, ORCID: 0000-0003-2722-5552; Researcher ID (WoS): AAE-1582-2019. polyuhovich_ma@spbstu.ru. ✉

Valente Ribeiro Muhongo graduated from Astrakhan State Technical University in 1994, PhD in Engineering (2019). He is a Professor of the Department of Mechanics, Polytechnic Institute, Katyavala Bwila University. His scientific works are devoted to the analysis and synthesis of technical systems and renewable energy. ORCID: 0000-0001-8729-6884; <https://www.researchgate.net/profile/Valente-Muhongo>. varmuhongo@yahoo.com.br.

Yulia Valeryevna Logvinova graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 2016, PhD in Engineering (2025). She is a Senior lecturer at the Higher School of Technosphere Safety, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. She is the author and a co-author of more than 20 publications in the field of occupational safety and professional risk assessment, as well as complex system modeling. Author ID (РИИЦ): 1026812; Author ID (Scopus): 57210916868; ORCID: 0000-0002-8392-1790; Researcher ID (WoS): F-9934-2019. logvinova_yuv@spbstu.ru.

Received June 28, 2025. Revised October 28, 2025. Accepted December 1, 2025.
