

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

АГЪЕКУМ ЭФРАИМ БОНАХ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ
ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ ГАНА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПЛОЩАДОК ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЭУ И СЭС**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ВЕЛЬКИН Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Соломин Евгений Викторович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»;

Куколев Максим Игоревич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор Высшей школы «Гидротехническое и энергетическое строительство» Инженерно-строительного института;

Матвеев Андрей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, ООО «НПП Динамика», г. Екатеринбург, заместитель директора

Защита состоится «23» июня 2022 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3550>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Сесекин Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие и использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) растет во всем мире, так как они являются «зелеными» и относительно надежными, а их стоимость постоянно снижается. ВИЭ способствуют переходу стран на более экологически ответственный уровень выработки энергии на основе применения экологически безопасного подхода к генерированию энергии, который оказывает долгосрочное положительное воздействие на климатические условия.

Представленная работа оценивает потенциал мест для установки крупномасштабной солнечной и ветровой энергии в Гане. Поскольку Гана находится в тропиках, технология солнечного фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) будет играть важную роль в вопросах, касающихся использования солнечной энергии, отвечающей требованиям устойчивого развития. Однако технология ФЭП имеет некоторые недостатки, такие как снижение эффективности с увеличением температуры и снижением преобразования энергии. Любое повышение температуры окружающей среды на 1 °С снижает производительность ФЭП на 0,4 - 0,5 %, поэтому в настоящем исследовании было предложено варианты охлаждения модулей ФЭП.

Актуальность работы. В настоящее время на долю ВИЭ Ганы приходится лишь 0,5 % энергетического баланса, что было признано крайне неадекватным, учитывая огромные ресурсы ВИЭ страны. Поэтому к 2030 году правительство Ганы планирует увеличить состав ВИЭ в энергетическом балансе страны примерно до 10%. В связи с отмеченным, актуальность работы по возобновляемой энергетике для Ганы сомнений не вызывает.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями по использованию ВИЭ для энергоснабжения сельских и изолированных населенных пунктов и разработкой электростанций на основе возобновляемых источников энергии занимались известные российские ученые: Алексеев В.А., Алферов Ж.И., Алексеенко С.В., Стребков Д.С., Безруких П.П., Елистратов В.В. Харченко В.В, Николаев В.Г., Щеклеин С.Е., Соломин Е.В., Шерьязов С.К. Из зарубежных ученых можно было бы указать известных Мартина Э., Кригеля Х., Йорга С. и Сюй Х. (все из Германии), Саати Т. (США), Аль Гарни Х. (Канада) и Дорг Дж. (Маврикий).

Цель: Исследование потенциала возобновляемой энергии и разработка методики расчета для определения оптимальных солнечных и ветровых парков республики Гана.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценка потенциала ВИЭ Ганы по солнечной и ветровой энергетике.
2. Определение оптимальных мест для установки ветряных и солнечных электростанций в Гане с использованием комбинации метода поиска оптимального размещения ВИЭ на основе кластеризации DBSCAN и метода анализа иерархии процессов (АНР).
3. Разработка способов снижения температуры солнечных фотоэлектрических модулей в жарких погодных условиях экваториальных стран для повышения производительности ФЭП.
4. Экспериментальный анализ различных способов снижения температуры ФЭП.
5. Разработка рекомендаций по размещению станций ВЭУ и ФЭП для северного, среднего и южного географических районах страны.

Объект исследования – солнечная и ветровая энергетика Республики Гана.

Предмет исследования – эффективность ФЭП, территории для размещения солнечных и ветровых установок в Республике Гана.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Впервые выполнена оценка потенциала солнечной энергетики и энергии ветра в трех географических зонах территории Республики Ганы: северной, центральной и южной.
2. Впервые на основе использования комплексной методики DBSCAN и АНР определены территории Ганы для солнечных и ветряных электростанций с учетом существующих линий электропередач и потенциальных объектов потребления.
3. Автором разработан и реализован эффективный двухповерхностный способ охлаждения ФЭП для экваториальных стран с жарким климатом, позволяющий повысить КПД солнечных станций.
4. Разработан и реализован способ охлаждения ФЭП, использующий комбинацию ребер из алюминия и материала с фазовым переходом (парафиновый воск), что позволило повысить КПД в условиях экваториальных стран.
5. Предложена и реализована комбинация ультразвукового увлажнителя и ребер из алюминия для эффективного охлаждения панели ФЭП для экваториальных стран

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложены и обоснованы территории в зонах Республики Гана для размещения ветро- и солнечных станций. Важной особенностью метода, используемого для определения эффективных территорий для установки возобновляемых источников энергии, является возможность определения границ территориальных кластеров.
2. Разработанные способы снижения температуры позволяют повысить эффективность модифицированных ФЭП до 5-11 % в жаркое время.

Методология и методы исследования. В ходе экспериментов использовались различные классические теоретические методы исследования возобновляемых источников энергии, метод поиска оптимального размещения ВИЭ на основе кластеризации DBSCAN, математический метод анализа иерархий, параметрические методы, такие как анализ чувствительности, а также методы статистической обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка технико-экономического потенциала и результаты выбора территорий для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики в Гане.
2. Результаты использования способа двойного поверхностного охлаждения фотоэлектрического модуля для повышения эффективности ФЭП.
3. Результаты повышения эффективности солнечных панелей за счет использования дискретных алюминиевых теплоотводов и ультразвукового увлажнителя для охлаждения ФЭП.
4. Результаты энергетического, и экономического анализа использования комбинации материала с фазовым переходом (парафиновый воск) и ребер из алюминия для охлаждения панели ФЭП.

Достоверность и обоснованность результатов исследования. Результаты данной работы хорошо согласуются с классическими методами расчета возобновляемых источников энергии, признанными программами, используемыми для расчета ВИЭ, такими как RETScreen, PVSyst, System Advisor Model (SAM), HOMER, и полученными результатами других авторов и ученых.

Личный вклад. Автор лично:

1. Предложил комбинацию метода поиска оптимального размещения ВИЭ на основе кластеризации DBSCAN и метода анализа иерархии процессов (АНР).
2. Разработал и смонтировал экспериментальные стенды и выполнил исследования по методам охлаждения ФЭП.

3. Теоретически и экспериментально исследовал эффективность разработанных методов повышения КПД ФЭП в условиях высоких температур окружающей среды.
4. Выполнил обработку и анализ полученных данных, обобщение и опубликование результатов исследований и рекомендаций по применению ФЭП в условиях экваториальных стран.
5. Разработал карту территориального районирования республики Гана с определением наиболее эффективных зон размещения ветро- и солнечных станций..

Апробация работы. Результаты настоящей диссертации были представлены и обсуждены на следующих конференциях: Международная научная конференция по электроэнергии (ISEPC-2019, 23-24-го мая 2019 года, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого); Международная научная конференция экологических и климатических технологий (КОНЭКТ (CONECT) 13-15-го мая 2020 года, Рига, Латвия); Международная конференция «Энергетика, экология, климат 2020, 6 июля—16 июля 2020 (WCAEE-ICEEC-2020, Москва); XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (27-30 апреля 2021 г. Томск, 2021); XVII Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика - 2020. Энергоэффективность. Системы автономного энергоснабжения стационарных и мобильных потребителей (Московский Энергетический Институт (МЭИ), Москва, Россия, 23-24 апреля 2020 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 научных статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 23 статьи – в журналах международных баз данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем дипломной работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 245 наименования и приложений. Всего в диссертации 224 страниц, 114 рисунков и 37 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе «**Введение**» представлена актуальность темы диссертации и цель диссертационного исследования.

Первая глава охватывает обзор текущего состояния энергетики в стране потенциала ВИЭ Ганы, описание различных возобновляемых источников энергии, имеющихся в стране: солнечных, ветряных, биоэнергетических, волновых и гидроресурсов. Представлен принятый в ноябре 2011 года парламентом Ганы «Закон о возобновляемых источниках энергии» (Закон 832), который направлен на обеспечение правовой основы развития ВИЭ. Показана организационная структура электроэнергетического сектора страны, и описано очень слабое развитие ВИЭ в настоящее время. Представлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена ветряной энергетике Ганы. Для определения мест размещения будущих ВЭУ был использован метод, включающий в себя комбинацию пространственного многокритериального анализа (MCDM), кластеризацию на основе плотности DBSCAN (впервые предложен Мартином Эстером, Хансом-Петером Кригелем, Йоргом Сандером и Сяовой Сюй, Германия) и метод анализа иерархии (АНР) для выявления и ранжирования потенциальных географических областей страны при проектировании ВИЭ. Эта комплексная методология обеспечивает автоматизированную процедуру оптимизации контуров границ территорий с использованием метода кластеризации на основе плотности DBSCAN. Выполнен технико-экономический анализ потенциальных ветряных электростанций для всех вероятных площадок по всей стране.

Метод кластеризации на основе плотности DBSCAN заключается в следующем: на основе плотности размещения территорий, а также влияния параметра значений эпсилон (радиус территорий, что является евклидовым расстоянием между двумя территориями) и соответствующего размера территории на процедуру кластеризации, представлены

графически на **рис. 1**. Территориальный кластер ВИЭ формируется, когда достигается минимальное требование к выборке, равное 9. Однако, поиск территорий для ВЭУ прекращается, если количество участков для расчета меньше 9. Результатом этого этапа является формирование кластеров минимального размера, которые удовлетворяют требованиям, определенным на этапе оценки зоны. В DBSCAN кластер представляет собой набор объектов данных, распределенных в пространстве данных по непрерывной области с высокой плотностью объектов. Объекты данных, расположенные в регионах с низкой плотностью, считаются выбросами.

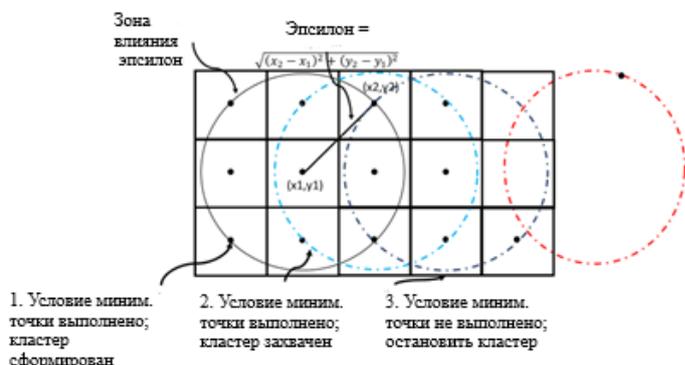


Рис. 1. Схема, характеризующая метод кластеризации на основе плотности (DBSCAN)

Методология АНР предложена профессором Томасом Л. Саати из Университета Питтсбурга (США) в 1977 г. Она относится к известному классу многокритериального принятия решений (MCDM). Каждый критерий в методе анализа иерархий (АНР) сравнивается попарно, и относительные значения оцениваются в соответствии с уровнем важности. Затем формируется матрица парных сравнений с использованием входных данных

соответствующих экспертов в научной области. В состав экспертов включены специалисты Энергетической комиссии Ганы, Министерства энергетики и некоторые другие специалисты, хорошо зарекомендовавшие себя как деятели энергетического сектора страны. Для применения метод анализа иерархий (АНР) были предприняты следующие шаги по получению весового коэффициента для каждого показателя. Пусть M – матрица парных сравнений, которая является квадратной матрицей $(n \times n)$, где n – количество субкритериев. Каждая ячейка a_{ij} матрицы M обозначает значения сравнения между критерием в i -й строке относительно критерия в j -ом столбце. Если ячейка $a_{ij} > 1$, то i -й критерий важнее j -го критерия и наоборот. Однако если $a_{ij} = 1$, то это показывает, что оба критерия имеют одинаковое значение. Метод геометрического среднего значения (ГСМ) использовался для обобщения суждений 20 экспертов, с которыми были проведены консультации. Приоритеты p_i для каждого участника, оцениваются с использованием метода геометрического среднего значения строки (МГМЗМ). Для матрицы $M = [a_{ij}]$ используются следующие выражения для нормализации и поиска коэффициента геометрической согласованности (КГС).

$$r_i = \text{эксп} \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ln(a_{ij}) \right] = \left(\prod_{i=1}^N a_{ij} \right)^{1/N} \quad (1)$$

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (2)$$

$$\text{КГС} = \frac{2 \sum_{i < j} \ln a_{ij} - \ln \frac{p_i}{p_j}}{(N-1)(N-2)} \quad (3)$$

где КГС - индекс геометрической согласованности

a_{ij} представляет сравнительную важность критерия a_i по сравнению с a_j .

p_i -приоритет каждого эксперта, с которым консультируются,
 N обозначает количество учитываемых факторов,
 r_i среднее геометрическое.

Матрица диссонанса мнения экспертов в методе АНР дает меру количества порядково-несовместимых триад в исходной матрице. Диссонанс (ординальная несогласованность псих-функции) определяется:

$$\psi_{ij} = \frac{1}{n-2} \sum_k \text{ступ}(-\log(a_{ij}) \log(a_{ik}a_{kj})) > 1 \quad (4)$$

где $i \neq k \neq j$ и ступенчатая функция представлена следующим образом: $\text{ступ}(x) = \begin{cases} 1 & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если иначе} \end{cases}$

Матрица диссонанса мнения экспертов в методе АНР дает меру количества порядково-несовместимых триад в исходной матрице. Тогда общий диссонанс найдется из среднего значения элементов этой матрицы диссонанса с использованием: $\psi = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \psi_{ij}$. Ошибки подсчитываются с использованием метода геометрического среднего значения строки:

$$\Delta_i = C \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \ln^2 \left(a_{ik} \frac{w_k^*}{w_i^*} \right)} \quad (5)$$

где $w_i = w_i^* \cosh(\Delta_i)$, $\Delta w_i = w_i^* \sinh(\Delta_i)$.

На выбор территории для установки СЭС и ВЭУ влияет множество факторов. Эти факторы можно разделить на технические, экологические, социальные и финансовые. Они зависят от биофизических характеристик, географического положения и социально-экономической инфраструктуры в изучаемой области (в нашем случае – в возобновляемой энергетике). В этой работе учитывался ряд факторов для исключения непригодных территорий Ганы, как для солнечных фотоэлектрических, так и для ветряных электростанций, сводка которых представлена в **таблицах 1 и 2**. Эти факторы были выбраны на основе обзора литературы.

Таблица 1. Факторы выбора мест для размещения ВЭУ

Фактор	Рейтинг пригодности			
	Очень подходит	Умеренно подходит	Низкая пригодность	Неподходящий
	3	2	1	0
Скорость ветра (м/с)	> 6	$5 < x \leq 6$	$4 < x \leq 5$	< 4
Близость к дорогам (км)	$0,5 < x \leq 2$	$2 < x \leq 5$	$5 < x \leq 10$	> 10
Близость к ЛЭП (км)	$0,5 < x \leq 2$	$2 < x \leq 5$	$5 < x \leq 10$	> 10
Землепользование	Бесплодные луга	Земли сельскохозяйственного назначения	Короткая растительность и кустарники	Населенные пункты, водно-болотные угодья, аэропорты и т. д.
Склон (%)	$0 \leq x \leq 7$	$7 < x \leq 12$	$12 < x \leq 15$	> 15
Расстояние до аэропортов (км)	> 4	$3,5 < x \leq 4$	$3 < x \leq 3,5$	≤ 3
Расстояние от жилой зоны (км)	> 3	$2 < x \leq 3$	$1 < x \leq 2$	≤ 1

Таблица 2. Критерии выбора места размещения солнечных электростанций

Фактор	Рейтинг пригодности			
	Очень подходит	Умеренно подходит	Низкая пригодность	Неподходящий
	3	2	1	0
Солнечное излучение, (GHI) (кВтч/м ² /день)	> 5,5	5 < x ≤ 5,5	4,7 < x ≤ 5	≤ 4,7
Охраняемые территории	Неохраняемые территории	-	-	Охраняемые территории, озера, реки
Склон, %	0 ≤ x < 1	1 ≤ x < 3	3 ≤ x < 5	≥ 5
Близость к транспорту (км)	0,5 ≤ x < 2	2 ≤ x < 5	5 ≤ x < 10	≥ 10
Расстояние до городских населенных пунктов (км)	> 1.5	-	-	≤ 1.5
Близость к ЛЭП (км)	0 < x < 2	2 ≤ x < 5	5 ≤ x < 10	≥ 10
Землепользование	Засушливая земля	Открытые дикие земли	-	Леса, сельхоз. угодья

На **рис. 2** показана блок-схема комбинированной модели выбора местоположения ветряной электростанции. Схема состоит из 4 шагов, используемых для определения и ранжирования потенциальных территорий по всей стране.

Первый шаг методологии призван исключить все неблагоприятные местоположения для ветроустановок и оставляет только те территории, которые соответствуют минимальным демографическим, экологическим и инфраструктурным показателям.

Второй шаг: имеющиеся территории оцениваются по средней скорости ветра с использованием статистических данных для 10 % наиболее доступных площадей в Гане, как показано на **рис. 3**. Эти статистические данные дают регионы, которые являются наиболее подходящими для установки ветряных электростанций. Третий шаг анализа касается применения кластеризации на основе плотности для обнаружения территориально плотных кластеров необходимого размера. Это приложение требует выбора соответствующего значения параметров DBSCAN, т.е. минимального размера кластера и соответствующих значений эpsilon (**см. рис. 1**). Минимальный размер кластера зависит от номинальной мощности генерации, требуемой от ветряной электростанции. В случае Ганы были проанализированы несколько вариантов с разными минимальными площадями ветряной электростанции: 2,25, 6,25 и 15,25 км² со значениями эpsilon (радиуса территории, который является евклидовым расстоянием между двумя точками) в диапазоне от $E=0,007072$; 0,014144 и 0,021216, соответственно. При постепенном увеличении параметров DBSCAN идентифицируются и локализуются более крупные доступные плотности территориальных кластеров.

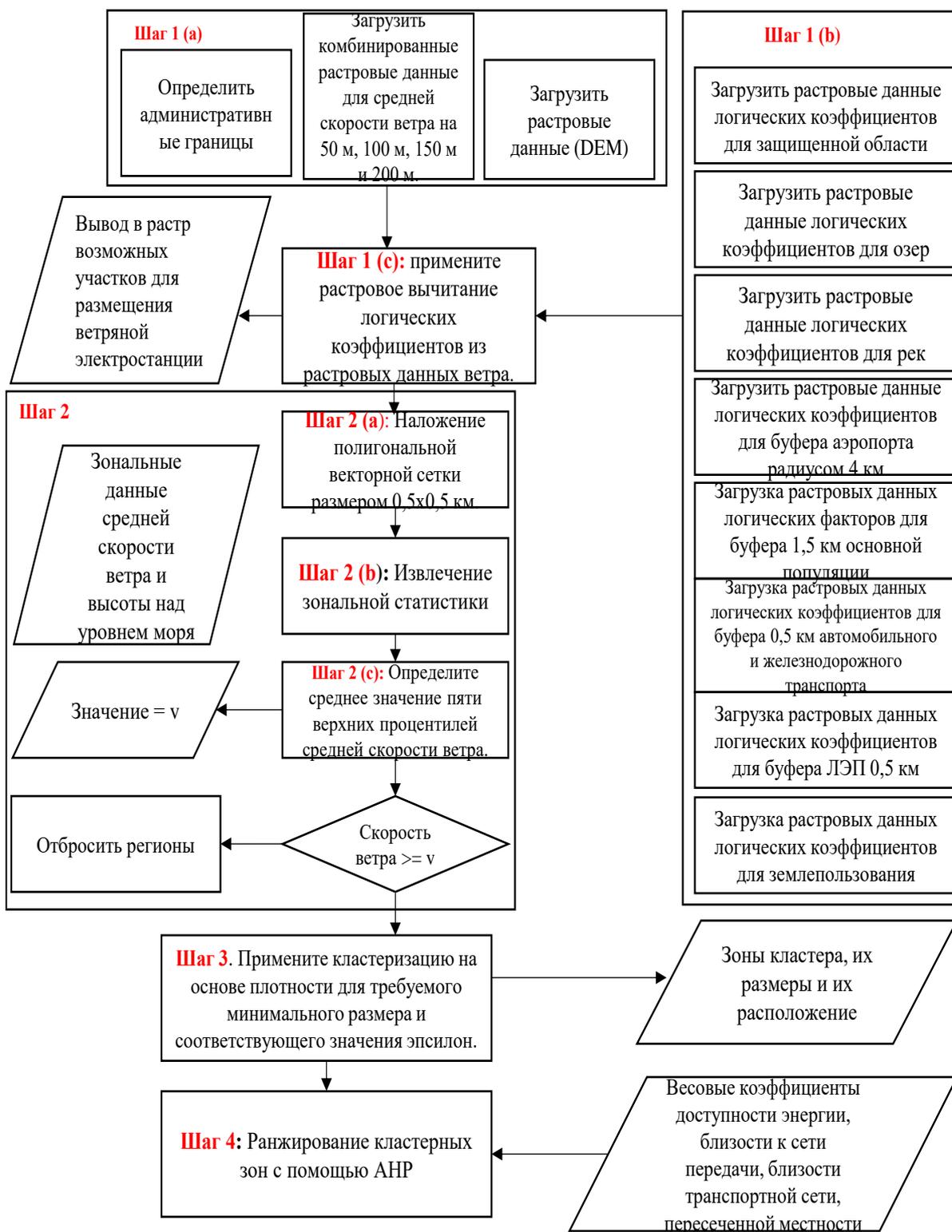


Рис. 2 Блок-схема комбинированной модели выбора местоположения ветряной электростанции методом ANP + DBSCAN

Анализ формирования территории кластера

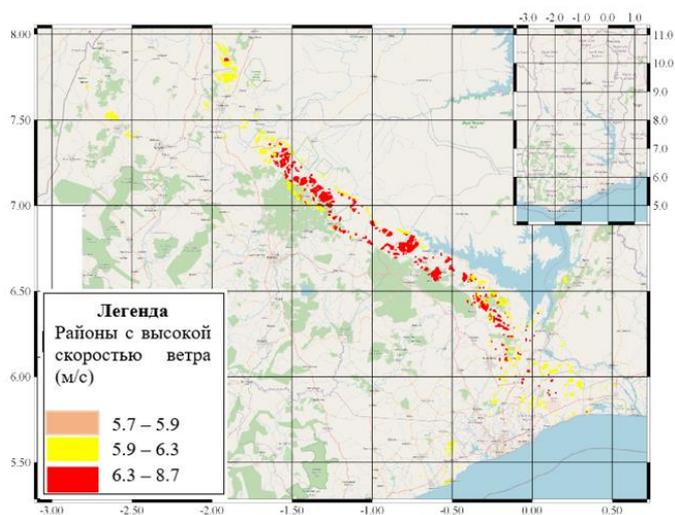


Рис. 3. Шаг 2: определение с помощью данных NASA топ-10% предпочтительных участков для размещения ветряных электростанций

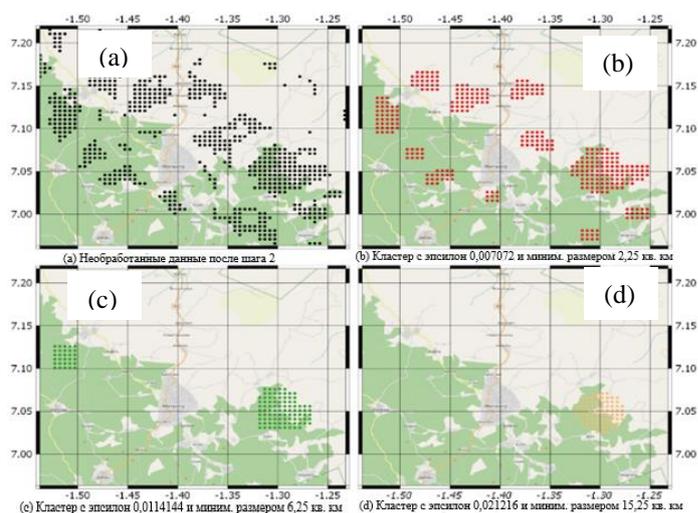


Рис. 4 (Шаг 3): Формирование контуров территориального кластера ВЭУ путем изменения параметров DBSCAN:

- (a) Исходные данные после шага 2
- (b) Кластер, использующий эpsilon (радиус) 0,007072, минимальный размер территории 2,25 км²
- (c) Кластер, использующий эpsilon (радиус) 0,014144, и минимальный размер территории 6,25 км²
- (d) Кластер, использующий эpsilon 0,021216, и минимальный размер территории 15,25 км²

развитие энергетического комплекса республики Гана. Ранжирование основано на энергетической доступности территориального кластера ВЭУ, территориальной близости к дорожной сети, рельефе местности и близости к сети линий электропередачи.

Характеристики скорости ветра в различных территориальных кластерах ВЭУ на высоте 50 м представлены на **рис. 6.**

ВЭУ показывает, что наилучшая оптимизация границ может быть достигнута с использованием параметров DBSCAN с $E=0,007072$ и минимальной площади 2,25 км². Эти параметры DBSCAN не только выявили наименьший территориальный размер кластера, но и позволили определить территориальные кластеры со сложными границами и выявить на территории Ганы 117 отдельных территориальных кластеров, размером от 2,25 км² (самый маленький), до кластера, размером 32 км² (самый большой). Сравнение вариантов эффективности территориальных кластеров ВИЭ представлено на **рис. 4.**

между соответствующими результатами DBSCAN в указанном местоположении с использованием различных параметров. Используя исходные данные после второго шага анализа, применяют DBSCAN путем изменения параметров, которые постепенно образовывали большие плотные кластеры. На основе DBSCAN на национальном уровне было выявлено 14 плотных кластеров с очень сильным ветром совместно с их контурами для оптимизации генерирования энергии, как показано на **рис. 5.** В совокупности эти 14 кластеров представляют собой приблизительно 280 км² и могут использоваться в качестве ветряных электростанций. Применение метода анализа иерархий (АНР) (см. **Таблицу 3**) дает ранжированный список территориальных кластеров ВЭУ для развития ветряных электростанций, одновременно оказывает влияние на

Таблица 3. Ранжирование потенциальных территорий для ВИЭ Ганы (экспертная оценка специалистов Ганы) по критериям

Критерий	Приоритет	Ранг	Погрешность (+/-)
Доступность энергии	0,570	1	12,7 %
Расширение сети передачи	0,108	3	1,9 %
Рельеф местности	0,253	2	5,3 %
Расширение транспортной сети	0,066	4	1,2 %

С использованием ранжирования и программы QGIS была получена карта (рис.5)

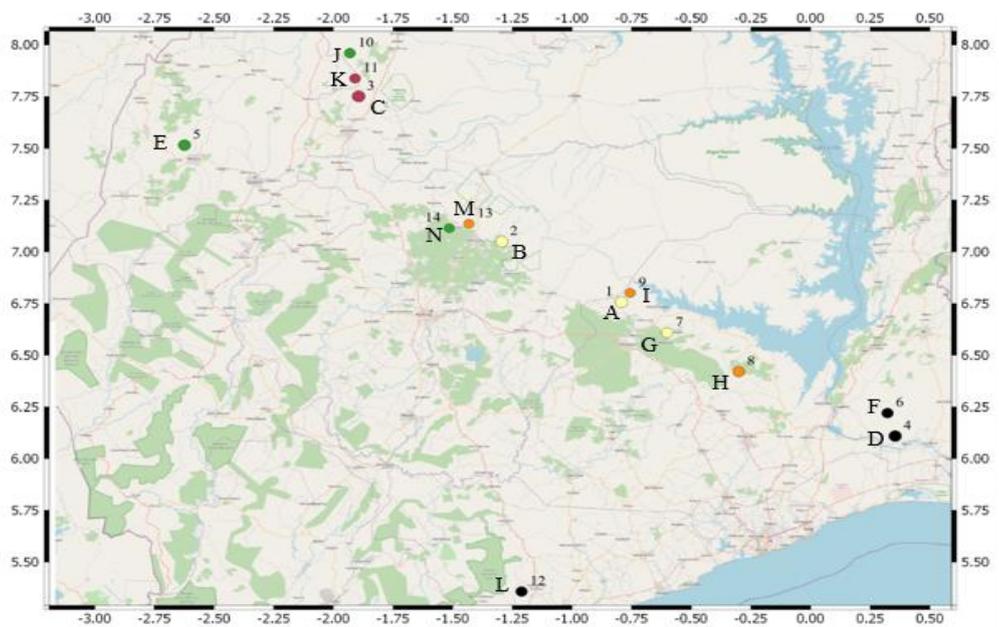


Рис. 5 (Шаг 4): (а) Ранжирование территориальных кластеров (от А до N) для размещения ВЭУ в Гане (скан из программы QGIS)

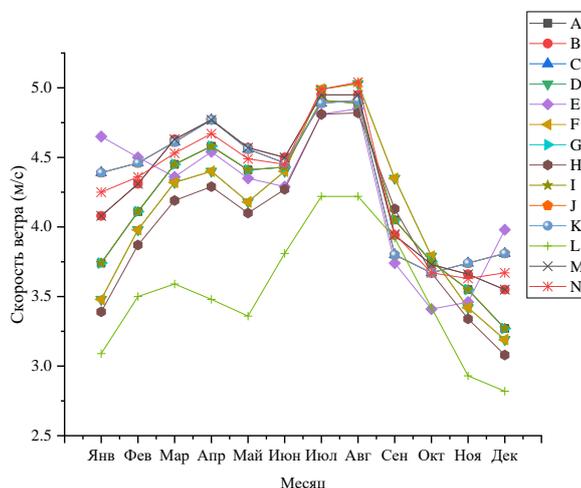


Рис. 6. Средние скорости ветра в различных территориальных кластерах ВЭУ на высоте 50 м в Гане

Многие территориальные кластеры ВЭУ находятся в относительной близости от национальных сетей передачи (ЛЭП) и транспортных коммуникаций (ж/д пути и дороги). Необходимо отметить, что высоко ранжированные территориальные кластеры ВЭУ находятся не рядом с побережьем, а в центральной части страны, вблизи городов Мампонг и Техиман. Чтобы понять возможное влияние различных мнений экспертов в области энергетики, был проведен анализ чувствительности метода иерархий (АНР) для оценки

влияния различных сочетаний критериев, измеренных по ранжированию, как показано на **рис. 7**. В ходе анализа рассмотрены три сценария чувствительности для проверки согласованности ранжирования территориальных кластеров ВЭУ. Базовый сценарий АНР для доступности энергии (технического параметра) дает весовой коэффициент 0,570 и для экономических показателей 0,429. Были рассмотрены еще два сценария: в первом из них мы присвоили равные весовые коэффициенты технико-экономическим показателям (50 % техническим и 50 % экономическим). Во втором из них текущие весовые коэффициенты АНР представили 0,43 у технических критериев и 0,57 у экономических. В этих двух дополнительных сценариях было проверено изменение ранжирования территориальных кластеров ВЭУ, как показано на **рис. 7**.

Для определения потенциала энергии ветра были всесторонне изучены территориальные кластеры ВЭУ (А-N). Их технико-экономические показатели, как и воздействие на окружающую среду, оценивались в программе HOMER для всей страны в привязке к комбинированной системе в составе: ВЭУ и ДГ.

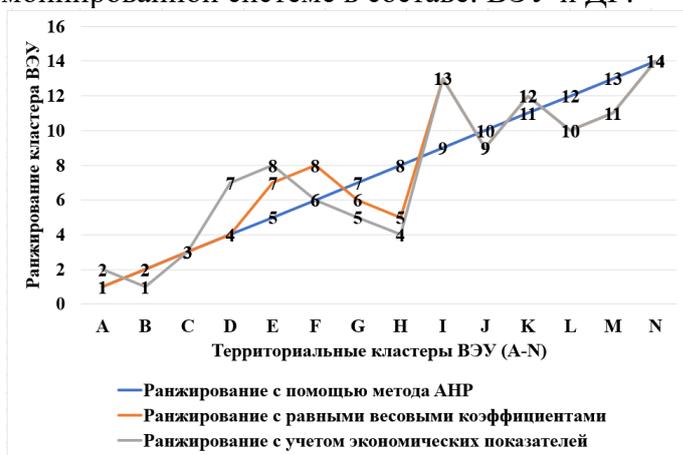


Рис. 7 Анализ чувствительности АНР

Результаты моделирования показывают (**рис.8**), что территориальный кластер ВЭУ С, расположенный рядом с городом Техиман, потенциально имеет самую высокую генерацию электроэнергии от ветряных электростанций. Самая низкая выработка электроэнергии от ветряных электростанций была рассчитана для территориального кластера ВЭУ L рядом с городами Абура и Асебу, Кваманкесский округ, в Центральном регионе

Ганы.

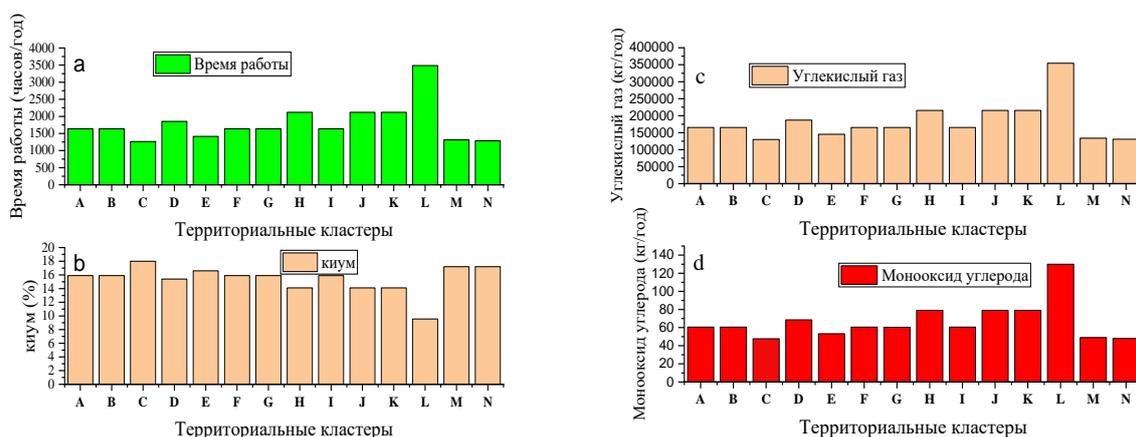


Рис. 8. Показатели эффективности территориальных кластеров ВЭУ (А-N)

а) время работы ДГ; б) КИУМ ВЭУ; в) выбросы углекислого газа; д) выбросы монооксида.

Результаты расчетов в HOMER показывают, что дизель-генераторы работали дольше в территориальном кластере L, что сказалось не только на экономике ВЭУ в этом районе, но и на уровне выбросов парниковых газов электростанций. Поэтому в территориальном кластере L получена самая высокая стоимость энергии 0,29 \$/кВтч из-за низкой скорости ветра в этом территориальном кластере ВЭУ. Территориальный кластер С был определен как наиболее эффективный, т.к. в нем рассчитана более низкая стоимость энергии 0,21 \$/кВтч с наименьшим выбросом парниковых газов. Это связано с высокой скоростью ветра

в этом территориальном кластере (С). Часы работы ДГ и коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) на различных территориальных кластерах ВЭУ показаны на **рис. 8**.

Понятно, что чем выше коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ветряной электростанции, тем меньше время работы дизель-генераторной электростанции. Поэтому более высокая средняя скорость ветра на конкретной территории приводит к снижению потребляемого топлива ДГ. Наибольшая выработка электроэнергии для ветряных электростанций в Гане рассчитана для июля и августа из-за более высоких скоростей ветра в этот период, а самая низкая в октябре, ноябре, декабре.

В третьей главе представлена оценка участков для размещения и разработки солнечных фотоэлектрических станций в Гане с использованием сочетания многокритериального принятия решения (АНР) и DBSCAN в среде QGIS, по аналогии с главой 2. После применения критериев оценки территории Ганы на основе методики АНР, её (территорию) подвергают кластеризации на основе плотности (DBSCAN), чтобы определить наиболее эффективные территориальные кластеры ФЭП для установки солнечных фотоэлектрических станций.

В настоящей главе рассматриваются лишь те территории Ганы, которые получают ежегодное интегральное излучение на горизонтальную площадку не менее 2000 кВтч/м² в год. Такими участками в Гане являются 20 % территории республики. В совокупности это составляют 6742 км² территории Ганы. Результаты расчета территориальных кластеров ФЭП проверены с помощью анализа многокритериального принятия решений (АНР) с использованием QGIS и показали хорошую сходимость. Регионы с высокой плотностью энергии для будущего размещения ФЭП солнечных фотоэлектрических станций показаны на **рис. 9**.

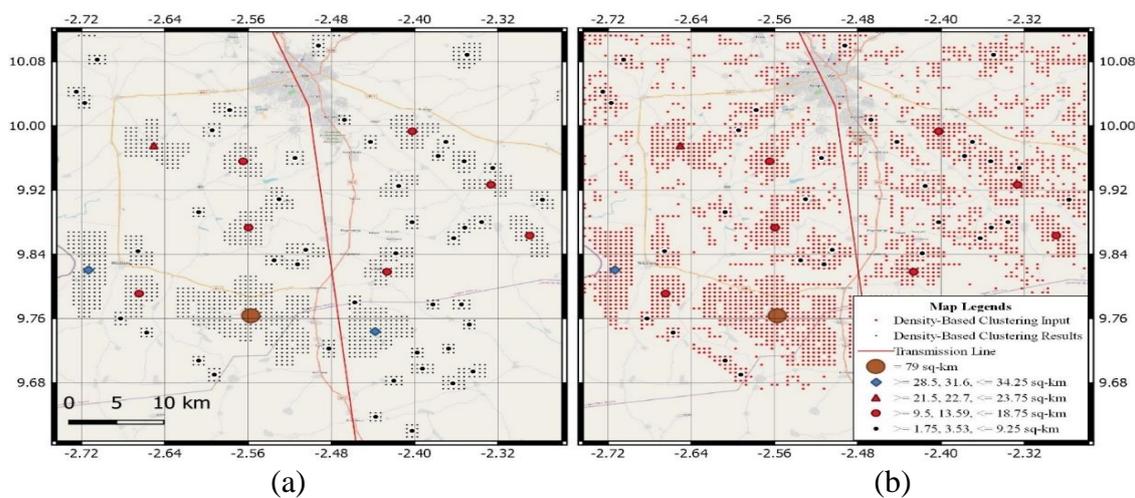


Рис. 9. Скан участков Ганы с различными территориальными кластерами ФЭП
а) QGIS + DBSCAN; б) QGIS

На **рис. 9** показаны территориальные кластеры ФЭП в Гане на основе DBSCAN. Этот метод демонстрирует территориальные кластеры для эффективного размещения ФЭП. На **рис. 9 (б)** показаны все возможные участки для размещения солнечных фотоэлектрических станций на основе QGIS. Окончательный выбор границ территории составлен с применением QGIS и DBSCAN. Применение кластеризации на основе плотности DBSCAN минимизирует вмешательство человека и определяет наиболее эффективные территориальные кластеры ФЭП минимальных размеров, как показано на **рис. 9 (а)**. С помощью программ QGIS + DBSCAN выявлено 38 территориальных кластеров, пригодных для крупномасштабного размещения солнечных фотоэлектрических станций общей площадью 784 км². Вышеописанные территориальные кластеры ФЭП показаны на **рис. 10**.

На **рис. 10 (а)** представлены 38 кластеров ФЭП вместе с их оптимальными границами территорий. Исходя из этого, можно идентифицировать три территориальных кластера ФЭП вблизи существующей национальной сети передачи электроэнергии (ЛЭП). Один из трех территориальных кластеров ФЭП находится в непосредственной близости от города Ва.

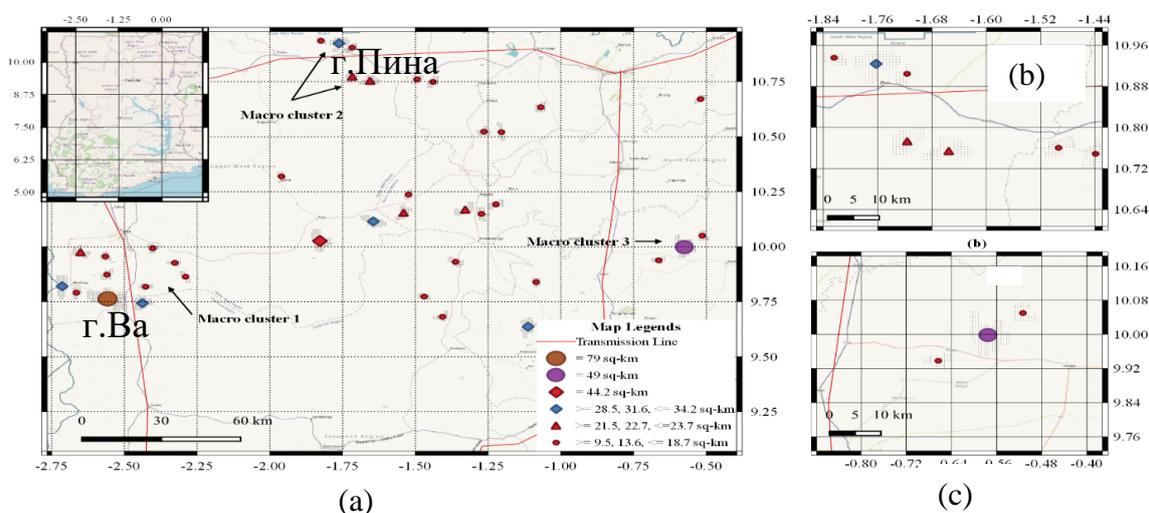


Рис. 10. Определение плотностей территориальных кластеров ФЭП для размещения солнечных электростанций в Гане

Второй территориальный кластер ФЭП находится вблизи северной границы Ганы, недалеко от города Пина. Этот кластер также находится в непосредственной близости от национальной сети ЛЭП и должен иметь приоритетное значение во время планирования строительства солнечной станции, как показано на **рис. 10 (b)**. Третий территориальный кластер ФЭП также расположен вблизи сети ЛЭП и имеет высокий потенциал для установки крупномасштабной солнечной фотоэлектрической станции (**рис. 10 (c)**).

Применение методологии АНР показало, что в регионе Верхнего Запада в районе г.Ва, территориальный кластер 1 имеет наиболее эффективную территорию для установки солнечных фотоэлектрических станций площадью около 264 км^2 и среднегодовым интегральным горизонтальным распределением излучения $\text{GHI (NASA)} = 1998,5 \text{ кВтч на м}^2$ в год. Территориальный кластер 3 на **рис.10 (c)**, согласно АНР, имеет второй приоритет; среднегодовой расчетный показатель горизонтального распределения излучения этого территориальный кластера составляет $\text{GHI (NASA)} = 1985,7 \text{ кВтч на м}^2$ в год, при этом общая площадь для установки солнечных фотоэлектрических станций, рассчитанная с использованием QGIS составляет $73,8 \text{ км}^2$. Территориальный кластер 2 (**рис.10(b)**) является третьим приоритетом, но он имеет самый высокий средний годовой показатель горизонтального распределения излучения $\text{GHI (NASA)} = 2 054,9 \text{ кВтч на м}^2$ в год и площадь $123,3 \text{ км}^2$. Карта Ганы с указанием эффективных территорий для установки ВЭУ и солнечных ФЭП представлена на **рис. 11**.

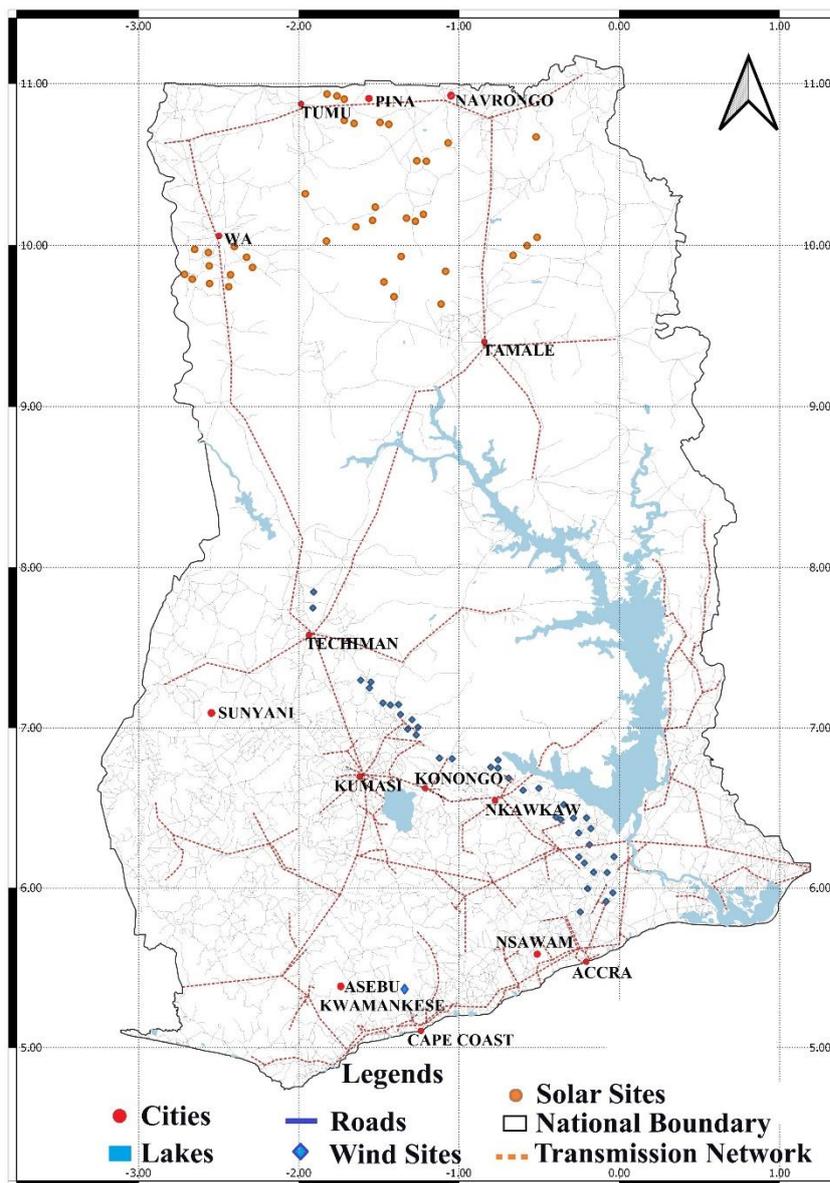


Рис. 11. Карта Ганы с указанием эффективных территорий для установки ВЭУ и ФЭП

В четвертой главе представлена оценка технико-экономического анализа использования ресурсов солнечной энергии в Гане. При рассмотрении потенциала солнечной энергии были рассмотрены две технологии: фотоэлектрические СЭС и термодинамические солнечные электростанции. Для выполнения анализа территория страны была разделена на три участка: северный, средний и южный, которые имеют различающиеся погодные характеристики. Для проведения экономического анализа с целью оценки целесообразности электростанций использовались критерии нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и чистой текущей стоимости (ЧТС). LCOE представляет собой стоимость электроэнергии, производимой электростанцией, и рассчитывается с помощью уравнения (6).

$$LCOE \text{ (реал.)} = \frac{-C_o - \frac{\sum_{n=1}^N C_n}{(1 + d_{nominal})^n}}{\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{(1 + d_{real})^n}} \quad (6)$$

где: C_o – сумма инвестиций в акционерный капитал электростанции (долл. США), C_n – стоимость проекта за n лет (включая эксплуатацию и техническое обслуживание, установки, финансовые расходы и сборы) (долл. США),

d_{real} – реальная учетная ставка (%), $d_{nominal}$ – номинальная учетная ставка (т.е. учетная ставка с инфляцией) (%), N – период для проведения анализа (годы), Q_n – энергия, выработанная электростанцией за год n (кВтч).

Производительность панелей ФЭП в основном зависит от факторов окружающей среды, таких как инсоляция и температура, и может быть рассчитана с помощью уравнений (7) и (8).

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (7)$$

где f_{PV} – коэффициент снижения номинальной мощности (%),

Y_{PV} – номинальная мощность панели ФЭП при стандартных условиях испытания (кВт), \bar{G}_T – солнечное излучение, падающее на панель ФЭП, (кВт/м²),

$\bar{G}_{T,STC}$ – падающее излучение при стандартных условиях испытания (кВт/м²),

α_p – температурный коэффициент мощности (% °C),

T_c – температура ФЭП (°C) и

$T_{c,STC}$ – температура ФЭП при стандартных условиях испытания (°C).

$$T_c = T_a + \bar{G}_T \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \right) \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau \alpha} \right) \quad (8)$$

где T_a – температура окружающей среды (°C),

$T_{c,NOCT}$ – номинальная рабочая температура элемента (°C),

$T_{(a,NOCT)}$ – температура окружающей среды, при которой номинальная рабочая температура элемента составляет 20 °C,

$G_{T,NOCT}$ – солнечное излучение, для которого определена номинальная рабочая температура элемента, т.е. 0,8 кВт/м²,

η_c – КПД преобразования электроэнергии ФЭП (%),

τ – коэффициент пропускания солнечного излучения через ФЭП (%),

α – коэффициент поглощения солнечного излучения ФЭП (%).

Сравнение производительности различных систем отслеживания представлено в **Табл. 4**.

Таблица 4. Сравнение эффективности двух различных систем отслеживания солнца

Критерий	Северная зона Ганы (г. Ва)		Центральная зона Ганы (г. Суньяни)		Южная зона Ганы (г. Нсавам)	
	Отслеживание по одной оси	Отслеживание по двум осям	Отслеживание по одной оси	Отслеживание по двум осям	Отслеживание по одной оси	Отслеживание по двум осям
ФЭП (система без АКБ)						
Энергия, ГВтч	40	43	36	38	37	39
Коэффициент мощности, %	23,3	24,9	20,6	21,8	21,0	22,1
Энерговыработка, кВтч/кВт	2 042	2 177	1 808	1 908	1 838	1 939
Коэффициент производительности	0,77	0,76	0,77	0,77	0,78	0,77
ФЭП (система с аккумуляторной батареей)						
Энергия, ГВтч	40	43	36	38	37	39
Коэффициент мощности, %	23,1	24,6	20,6	21,8	20,9	22,1
Энерговыработка, кВтч/кВт	2 021	2 155	1 808	1 907	1 832	1 934
Коэффициент производительности	0,76	0,76	0,77	0,76	0,77	0,77

Первоначально для анализа использовалось положение ФЭП, при котором панели фиксировались под углом наклона 45° и не перемещались.

Расчетные данные для термодинамических СЭС башенного типа в Навронго и Тамале были получены LCOE в 13,67 центов/кВтч и 14,73 цента/кВтч соответственно. На СЭС параболического типа (ПСК) в Тамале и Навронго также получили расчетную LCOE в 28,83 цента/кВтч и 25,83 цента/кВтч, соответственно. Было установлено, что величина, кратная оптимальному солнечному излучению для СЭС башенного типа, находится в пределах 1,4-1,9. Это связано с тем, что минимальная LCOE для различных периодов хранения тепловой энергии (ХТЭ) находится в пределах этого диапазона. В случае ПСК величина, кратная оптимальному солнечному излучению, также зависит от периода ХТЭ. Кроме того, каждое ХТЭ имеет отдельную величину, кратную оптимальному солнечному излучению в диапазоне от 2,4 до 4. Результаты анализа показывают, что технология для СЭБ является оптимальной системой для погодных условий Ганы, поскольку она зафиксировала минимальную нормированную стоимость электроэнергии. На **рис. 12** и **рис. 13** приведены результаты для обеих электростанций на двух объектах.

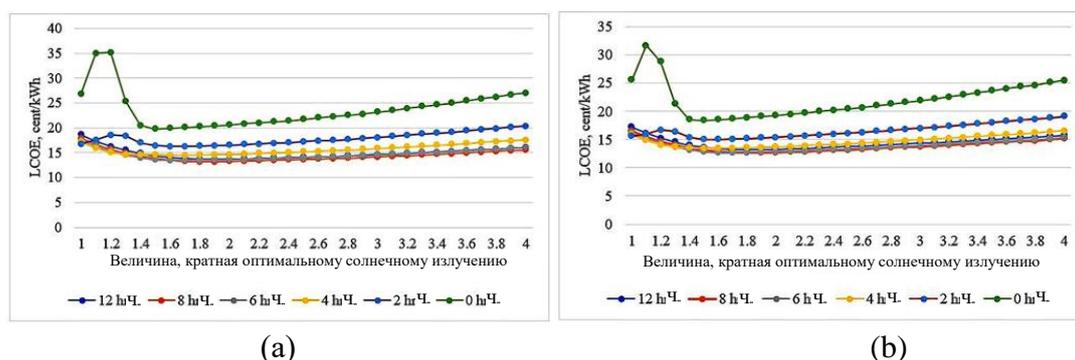


Рис. 12. LCOE для солнечной электростанции башенного типа в (a) Навронго и (b) Тамале в период ХТЭ

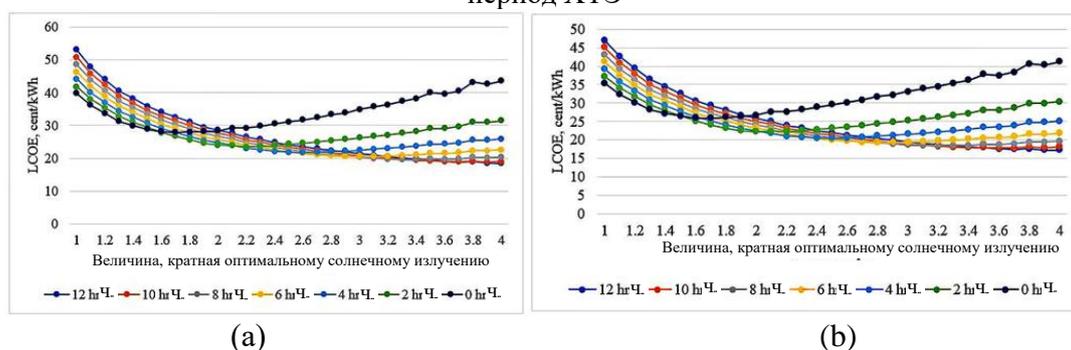


Рис. 13 NSC для ПСК в (a) Тамале и (b) Навронго в разные периоды ХТЭ

Комбинированная система электростанций ФЭП/ВЭУ/ДГ/АКБ была рассчитана для южной части Ганы с целью оценки ее целесообразности при выработке энергии в сельских районах с использованием прикладной программы HOMER. Расчет энергии, вырабатываемой электростанцией комбинированного типа ФЭП/ВЭУ/ДГ/АКБ, показал высокую долю дизельного генератора (ДГ), который выработал 842712 кВтч электроэнергии за год, что составляет 85,9 %. Ветряная электростанция, как показал расчет, выработала бы 103154 кВтч электроэнергии за год, что составляет 10,5 % от общего объема электроэнергии, выработанной комбинированной электростанцией. Солнечная электростанция, при этом, произвела бы меньше всего электроэнергии за год 35293 кВтч, что составляет 3,6 % всей выработанной электроэнергии. На **рис. 14** показано ежемесячное расчетное производство электроэнергии различными электростанциями. ДГ показал больше всего потенциальной выработки во второй половине дня и в январе-марте, а также в последние три месяца года, когда скорость ветра находится на самом низком уровне из-за сезона харматана (сухой сезон в Гане).

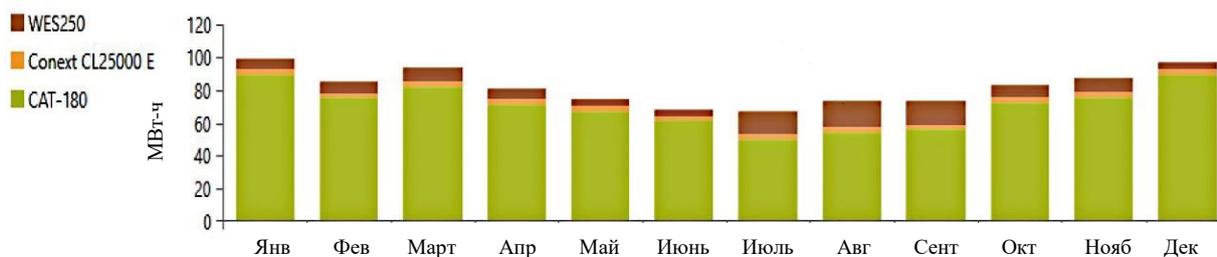


Рис. 14. Генерация электроэнергии системой ФЭП/ВЭУ/ДГ/АКБ

В пятой главе представлены три разработанных способа снижения температуры панелей ФЭП, что очень важно для Ганы, которая расположена в тропиках с высокими температурами, что влияет на производительность модулей ФЭП. Максимальная мощность модуля ФЭП может быть рассчитана следующим образом:

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (9)$$

где максимальная мощность – P_{mp} ,

I_{mp} и V_{mp} – это ток и напряжение модуля соответственно.

Ток короткого замыкания и напряжение в разомкнутой цепи также обозначаются I_{sc} и V_{oc} соответственно, а FF – это коэффициент заполнения. Уравнение Эванса и Флоршуэца: $\eta_{электр} = \eta_{ст} [1 - \beta_{ст} (T_{панели} - T_{ст})]$ связывает температуру панели с её КПД. Где стандартный КПД модели ФЭП при стандартных условиях испытания представлен как $\eta_{ст}$, который принимается равным 15 % для данной работы,

$\beta_{ст}$ – это температурный коэффициент, который также принимается равным $0,004 \text{ C}^{-1}$ для данного исследования, температура стандартных условий испытания представлена как T_{ref} , которая равна $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Повышение электрического КПД ФЭП модуля в результате процесса охлаждения может быть вычислено следующим образом:

$$\text{повышение КПД} = \frac{\eta_{\text{ФЭП охлад.}} - \eta_{\text{ФЭП ст}}}{\eta_{\text{ФЭП ст}}} \times 100\%.$$

Энергетическая производительность модуля ФЭП уменьшается с увеличением температуры, главным образом, из-за увеличения скорости внутренней рекомбинации носителей, которая вызывается их повышенными концентрациями.

Температура модулей ФЭП оказывает существенное влияние на КПД модуля: повышение температуры снижает энергетическую производительность модуля.

Экспериментальная установка для снижения температуры ФЭП состоит из охлажденной панели с использованием хлопчатобумажной сетки, закрепленной на задней стороне панели, которая охлаждается водой с помощью капиллярного воздействия (рис. 15). Трубка диаметром 16 мм из поливинилхлорида (ПВХ) была соединена с источником воды в баке на высоте выше, чем панель ФЭП. Это необходимо для обеспечения свободного потока воды с использованием ускорения силы тяжести без необходимости использования дополнительной энергии для перекачки воды в модуль; насос, однако, необходим для перекачивания воды обратно в бак для хранения. Трубка из ПВХ была перфорирована отверстиями диаметром 1 мм вдоль ее длины для того, чтобы вода могла течь из трубки в хлопчатобумажную сетку и одновременно на переднюю поверхность панели. Часть хлопчатобумажной сетки, которая проходит вниз по задней стороне панели ФЭП, обернута вокруг трубки в верхней части панели ФЭП, так что она может поглощать воду из перфорированной трубки для охлаждения задней части панели ФЭП, как показано на рис.15. Эксперимент зафиксировал падение температуры панели на $23,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Охлажденный модуль ФЭП зафиксировал средний КПД – 14,4 % в сравнении с 12,8 % для неохлажденной панели, что представляет разницу в 1,6 %, или на 11,9 % выше электрического КПД неохлажденной панели (рис. 16.)

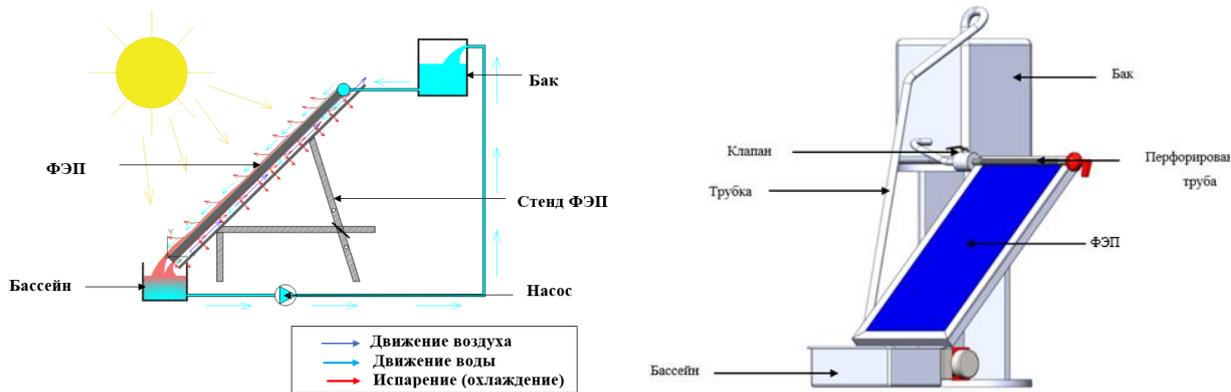


Рис. 15. Принципиальная схема экспериментальной установки

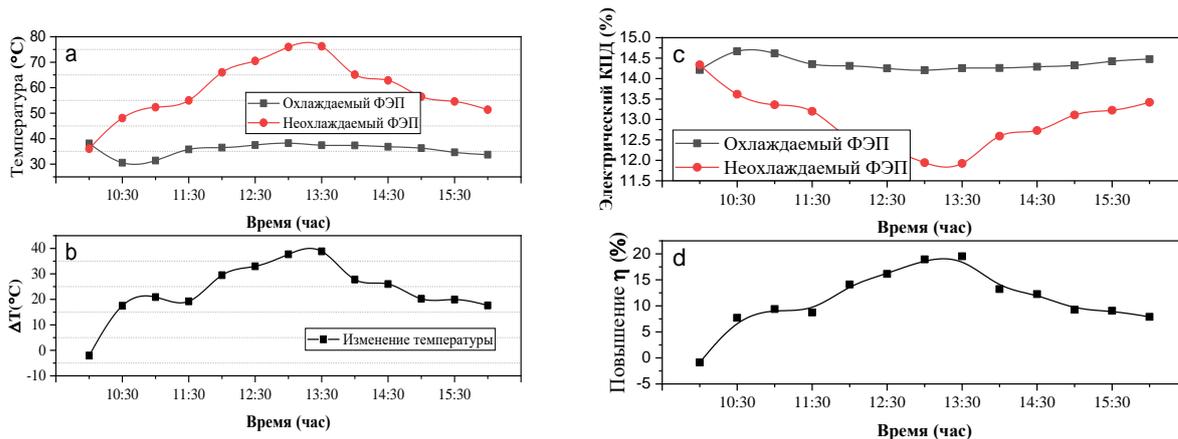


Рис. 16. (а) График температур охлаждаемого и неохлаждаемого ФЭП; (б) изменение температуры между охлаждаемым и неохлаждаемым ФЭП; (с) электрический КПД охлаждаемого (нетто) и неохлаждаемого ФЭП; (d) повышение КПД охлаждаемого ФЭП

Второй эксперимент представлял другой способ охлаждения ФЭП (рис.17). На ФЭП были выполнены ребра из алюминия, а ультразвуковой увлажнитель для создания влажной (паровой) среды для охлаждения ребер размещен в бассейне с водой. Скорость передачи тепла от задней поверхности панели ФЭП регулируется законом охлаждения Ньютона в соответствии с формулой $Q_{конв} = hA_s(T_s - T_a)$, где площадь и температура теплопередающей поверхности обозначены как A_s и T_s , а h – это коэффициент конвекционной теплопередачи. Как видно из уравнения охлаждения по закону Ньютона, скорость теплопередачи может быть увеличена двумя способами: либо увеличением коэффициента конвекционной теплопередачи h в форме активного охлаждения, либо увеличением площади поверхности теплопередачи A_s , что является пассивным охлаждением. Именно по этой причине ребра из алюминия были использованы в данном исследовании – для увеличения площади поверхности скорости теплопередачи.

Предложенный способ охлаждения способствовал стабилизации температуры панели даже при очень высоких температурах нагрева элементов ФЭП (до 60°) в течение дня. Максимальная температура составила 62,1 °С для стандартной панели и была зафиксирована в 13:30, в то время как охлаждаемая панель показала температуру 42,0 °С в тот же период, что свидетельствует о положительном влиянии процесса охлаждения на регулирование температуры модуля ФЭП. Способ охлаждения, примененный в этом исследовании, позволил снизить температуру модуля на его самом высоком пике в день эксперимента на 20,5 °С. Средняя температура охлажденной панели за весь экспериментальный период составляет 35,7 °С в сравнении с температурой 50,4 °С для стандартного модуля. В среднем указанный способ охлаждения позволил понизить температуру панели на 14,6 °С. Средняя мощность 12,2 Вт была зарегистрирована для

охлажденной панели в сравнении с мощностью 10,9 Вт для контрольного (неохлаждаемого) модуля, что свидетельствует о повышении выходной мощности модуля на 12,51 %. Средний электрический КПД охлажденной панели составил 14,4 %, в то время как стандартный модуль имел 13,48 %, что свидетельствует об улучшении на 6,8 % электрического КПД модуля за счет системы охлаждения. Результаты показаны на **рис. 18**.

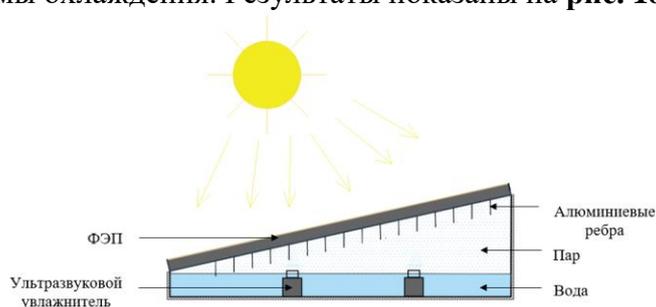


Рис. 17. Схема установки для охлаждения ФЭП

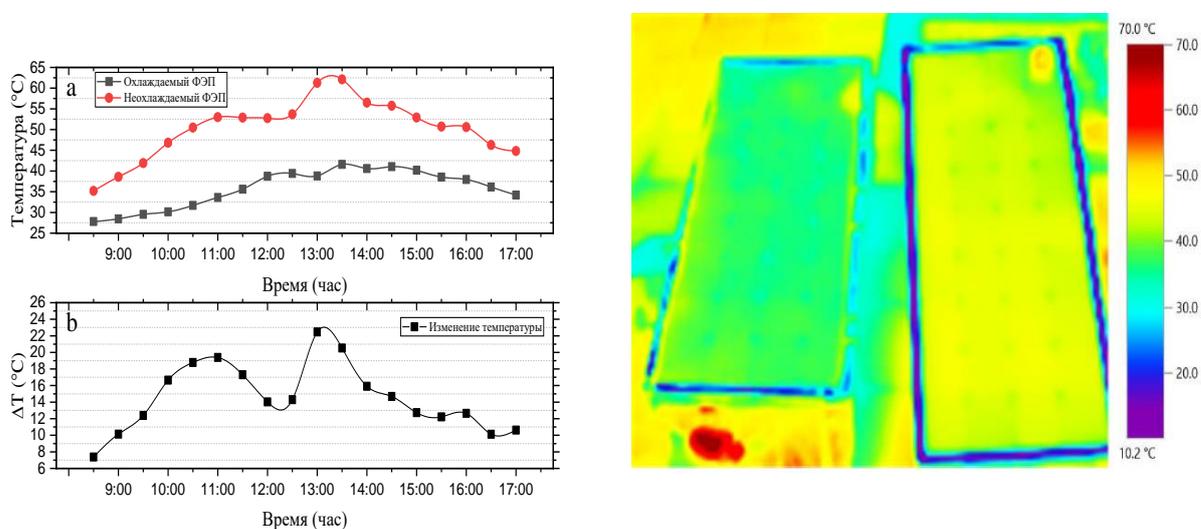


Рис. 18. Влияние процесса охлаждения на температуру панели ФЭП

В третьем эксперименте предложен способ, в котором используется комбинация материала с фазовым переходом (парафин) и ребер из алюминия для управления и снижения температуры модуля ФЭП. Способ позволил уменьшить утечки расплавленного материала с фазовым переходом, что обеспечивало естественное охлаждение воздуха с тыльной стороны модуля ФЭП. В указанном способе парафиновый воск помещался в цилиндрические алюминиевые контейнеры, которые закреплялись на задней стороне модулей ФЭП (**рис. 19**). Для определения изменения материала с фазовым переходом (жидкий или твердый) с удельной теплоемкостью для каждой фазы температурное поле задается как показано в **уравнении (10)**.

$$T = \begin{cases} E/c_s & T < T_m \text{ (твердая фаза)} \\ T_m & 0 < E < H, T > T_m \text{ (зона плавления)} \\ T_m + (E - H)/c_L & E \geq H, T > T_m \text{ (жидкая фаза)} \end{cases} \quad (10)$$

где тепловая энергия – E (Дж/кг),
 c – удельная теплоемкость для каждой фазы,
 H (Дж/кг) – скрытая теплота.



Рис. 19. Экспериментальная установка с размещением парафина на задней стороне панели ФЭП

Температурные результаты нового охлаждающего механизма представлены на **рис. 20**. Как видно из рисунка, охлажденная панель регистрировала относительно более холодные температуры в течение всего эксперимента. Средняя температура для охлажденной панели за весь период эксперимента составляет 36,6 °С в сравнении с 48,8 °С для контрольного модуля ФЭП, что означает среднее понижение температуры на 12,2 °С для охлаждаемой панели.

КПД контрольного модуля ФЭП ниже из-за высоких температур, зарегистрированных в течение всего периода эксперимента. Расчетный средний КПД охлаждаемой или модифицированной панели и контрольного модулей составляет 14,3 % и 13,6 % соответственно, как показано на **рис. 21**, что свидетельствует о повышении КПД модуля ФЭП на 5,15 %.

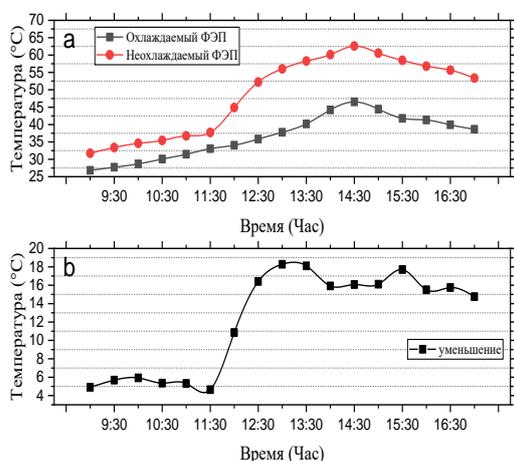


Рис. 20. Температура для охлажденного и стандартного модуля

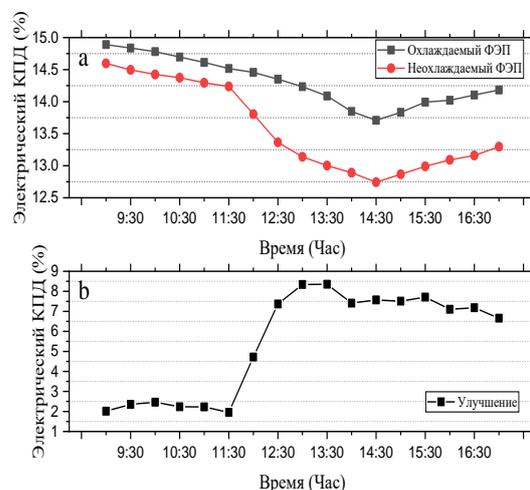


Рис. 21. Электрический КПД для обеих панелей

Заключение

В работе рассмотрена возможность развития ВИЭ в Республике Гана.

На основании моделирования, теоретических расчетов и экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты технико-экономической оценки потенциала солнечной и ветровой энергетики следующие:
 - Северная часть Ганы определена как место с наибольшим потенциалом для солнечной фотоэлектрической электростанции. Смоделированная

фотоэлектрическая электростанция мощностью 20 МВт в трех частях страны сможет произвести в трех регионах Ганы 31 ГВтч, 28 ГВтч и 28 ГВтч энергии за первый год для северного, среднего и южного секторов соответственно.

- результаты для термодинамических СЭС мощностью 100 МВт, то есть башенного типа и параболического типа, смоделированных в Навронго и Тамале, показывают, что в случае их реализации Гана может снизить текущую стоимость электроэнергии, которая в н.в. составляет 15-25 центов/кВтч, до 13,67 центов/кВтч, используя башенный тип СЭС. Город Навронго был определен как лучшее место для строительства термодинамических СЭС в Гане. Генераторы башенного типа, построенные на двух изучаемых территориях, смогут генерировать в общей сложности от 393 ГВтч до 424 ГВтч, а параболического типа смогли бы генерировать от 190 ГВтч до 211 ГВтч в год.
 - На 14 территориальных кластерах ВЭУ можно построить отдельные ВЭС, что позволит достичь LCOE до 0,10 - 0,13 \$/кВтч. Система ВЭУ/ДГ/АКБ в 14 населенных пунктах страны зафиксировала LCOE в диапазоне 0,21–0,22 \$/кВтч.
2. Разработана карта Ганы с указанием эффективных мест для крупномасштабных солнечных и ветряных электростанций. Результаты оценки с использованием комбинации DBSCAN и АНР, реализованной в QGIS:
- Всего определено 3 территориальных кластера ФЭП для установки крупномасштабных фотоэлектрических электростанций в Гане, с наибольшим потенциалом в северной части. Результаты по АНР показывают, что г.Ва находится в районе Верхнего Запада, т.е. территориальный кластер ФЭП 1, имеет самые большие пригодные площади для установки крупномасштабной солнечной фотоэлектрической электростанции (около 264 км²).
- Территориальный кластер 3 занимает второе место в АНР с общей площадью 73,75 км². Территориальный кластер ФЭП 2 занимает третье место по приоритетности АНР с площадью 123,25 км².
- Всего было определено 14 территориальных кластеров ВЭУ для установки крупномасштабных ВЭС в Гане. Вместе эти 14 территориальных кластеров составляют примерно 280 км². Средний размер территориальных кластеров около 19 км², максимальный размер до 32 км². Все найденные кластеры находятся в относительной близости к транспортным сетям и сети передачи.
3. Экспериментально доказано, что температуру ФЭП в жарких погодных условиях можно снизить в среднем на 23,5 °С, используя предложенный механизм охлаждения с двумя поверхностями по более низкой цене. Снижение температуры ФЭП привело к общему повышению электрического КПД на 11,9%.
4. Модифицированный ФЭП в сочетании с парафином, хранящимся в цилиндрических контейнерах, и алюминиевыми пластинами на его задней поверхности привел к снижению температуры на 12,13 °С. Это привело к повышению эффективности на 5,15% для модифицированного ФЭП. Экспериментально было доказано, что интеграция комбинации парафинового воска и алюминиевых ребер на задней поверхности ФЭП может снизить LCOE ФЭП на 10,5%.

Интеграция щеткообразных алюминиевых ребер в задней части ФЭП, охлаждаемых ультразвуковым увлажнителем, снизила температуру панели на 14,61 °С. Это привело к увеличению выходной мощности модифицированного ФЭП на 12,51%.

Рекомендации по использованию материалов научного исследования:

Для того, чтобы к 2030 году государство достигло планируемых 10% возобновляемой энергии в структуре производства электроэнергии в стране, рекомендуется следующее:

- Создание инвестиционного климата для поддержки частного сектора в переходе к развитию и использованию возобновляемых источников энергии, включая, помимо прочего: инвестиционные субсидии, конкурентоспособные льготные тарифы и

освобождение от налога с продаж оборудования для возобновляемых источников энергии.

- Выявленные территориальные кластеры как для ВЭУ, так и для ФЭП должны научно обосновываться для руководства страны, местных и иностранных инвесторов;
- В исследовании впервые были научно обоснованы эффективные территориальные кластеры для размещения ВЭУ и ФЭП учетом имеющихся дорог и линий электропередач. Это дает правительству и инвестору представление о потенциальных затратах на развитие различных направлений возобновляемой энергетики Ганы.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Yaqoob S. J. A new model for a photovoltaic panel using Proteus software tool under arbitrary environmental conditions / S. J. Yaqoob, S. Motahhir, **E. B. Agyekum** // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 333. P. 130074. 0,86 п. л. / 0,33 п. л (**Scopus, WoS**).
2. **Agyekum E. B.** Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation/ **E. B. Agyekum**, S. PraveenKumar, N.T. Alwan, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // Heliyon. 2021. Vol. 7. P. e0792. 0,56 п. л. / 0,20 п. л. (**Scopus, WoS**).
3. **Agyekum E. B.** Optimizing photovoltaic power plant site selection using analytical hierarchy process and density-based clustering – Policy implications for transmission network expansion, Ghana/ **E. B. Agyekum**, F. Amjad, L. Shah, V. I. Velkin // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. P. 101521. 0,75 п. л / 0,25 п. л (**Scopus, WoS**).
4. **Agyekum E. B.** Experimental Investigation of the Effect of a Combination of Active and Passive Cooling Mechanism on the Thermal Characteristics and Efficiency of Solar PV Module/ **E. B. Agyekum**, S. PraveenKumar, N.T. Alwan, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein, S. J. Yaqoob // Inventions 2021. Vol. 6. P. 63. 1,0 п. л / 0,17 п. л (**Scopus, WoS**).
5. **Agyekum E.B.** Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Combination of Phase Change Material and Aluminum Fins—Exergy, Energy and Economic (3E) Analysis/ **E. B. Agyekum**, S. PraveenKumar, N.T. Alwan, V. I. Velkin, T. S. Adebayo // Inventions 2021. Vol. 6. P. 69. 1,31 п. л / 0,2 п. л (**Scopus, WoS**).
6. **Agyekum E. B.** Design and Construction of a Novel Simple and Low-Cost Test Bench Point-Absorber Wave Energy Converter Emulator System/ **E. B. Agyekum**, S. PraveenKumar, A. Eliseev, V. I. Velkin. // Inventions. 2021. Vol. 6. P. 20. 0,93 п. л / 0,25 п. л (**Scopus, WoS**).
7. S. PraveenKumar. Thermal Management of Solar Photovoltaic Module to Enhance Output Performance: An Experimental Passive Cooling Approach Using Discontinuous Aluminum Heat Sink/ P. Seepana, **E. B. Agyekum**, Alwan N. T., V. I. Velkin, S. J. Yaqoob, T. S. Adebayo // International Journal of Renewable Energy Research. 2021. Vol. 11. P. 1700-1712. 0,81 п. л / 0,17 п. л (**Scopus, WoS**).
8. Qasim A. M. A New Maximum Power Point Tracking Technique for Thermoelectric Generator Modules / A. M. Qasim, N. T. Alwan, S. PraveenKumar, V. I. Velkin, **E. B. Agyekum** // Inventions. 2021. Vol. 6. P. 88. 0,69 п. л / 0,2 п. л (**Scopus, WoS**).
9. **Agyekum E. B.** Clean Energies for Ghana – An Empirical Study on the Level of Social Acceptance of Renewable Energy Development and Utilization/ **E. B. Agyekum.**, E. B. Ali, N. M Kumar // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 3114. 0, 88 п. л / 0,33 п. л (**Scopus, WoS**).
10. **Agyekum E. B.** A bird’s eye view of Ghana’s renewable energy sector environment: A Multi-Criteria Decision-Making approach / **E. B. Agyekum.**, M. A .Amjad F. Mohsin., M. N. S. Ansa // Utilities Policy. 2021. Vol. 70. P. 101219. 1,06 п. л / 0,25 п. л (**Scopus, WoS**).
11. Alwan N. T. Experimental and Theoretical Investigations of a Modified Single-Slope Solar Still with an External Solar Water Heater/ N. T. Alwan, S. E. Shcheklein, O. M. Ali, M. H. Majeed, **E. B. Agyekum** // Sustainability 2021. Vol. 13. P. 12414. 1,60 п. л / 0,2 п. л (**Scopus, WoS**).
12. **Agyekum E. B.** Techno-economic comparative analysis of solar photovoltaic power systems with and without storage systems in three different climatic regions, Ghana / **E. B. Agyekum**

- // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 43. P. 100906. 0,94 п. л / 0,94 п. л (**Scopus, WoS**).
13. Amjad F. Site location and allocation decision for onshore wind farms, using spatial multi-criteria analysis and density-based clustering. A techno-economic-environmental assessment, Ghana/ F. Amjad, **E. B. Agyekum**, L. A. Shah, A. Abbas // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. P. 101503. 1,13 п. л / 0,25 п. л (**Scopus, WoS**).
 14. Yaqoob S. J. Comparative study with practical validation of photovoltaic monocrystalline module for single and double diode models / S. J. Yaqoob, A. L. Saleh, S. Motahhir, **E. B. Agyekum** // Sci Rep 2021. Vol. 11. P. 19153. 0,88 п. л / 0,17 п. л (**Scopus, WoS**).
 15. Gyamfi B. A. Beyond environmental Kuznets curve and policy implications to promote sustainable development in Mediterranean / B. A. Gyamfi, T. S. Adebayo, F.V. Bekun, E. B. Agyekum, N. M. Kumar, H. H. Alhelou, // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 6119-6129. 0,69 п. л / 0,14 п. л (**Scopus, WoS**).
 16. **Agyekum E. B.** Decarbonize Russia—A Best–Worst Method approach for assessing the renewable energy potentials, opportunities and challenges/ **E. B. Agyekum**, N. M. Kumar, U. Mehmood, M. K. Panjwani, H. H. Alhelou, T. S. Adebayo, A. Al-Hinai // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 4498-4515. 1,125 п. л / 0,14 п. л (**Scopus, WoS**).
 17. **Agyekum E. B.** Effect of Two Different Heat Transfer Fluids on the Performance of Solar Tower CSP by Comparing Recompression Supercritical CO₂ and Rankine Power Cycles, China / **E. B. Agyekum**, T. S. Adebayo, F. V. Bekun, N. M. Kumar, and M.K. Panjwani, // Energies, 2021. Vol. 14. P. 3426. 1,19 п. л / 0,20 п. л (**Scopus, WoS**).
 18. **Agyekum E. B.** Energy poverty in energy rich Ghana: A SWOT analytical approach for the development of Ghana’s renewable energy/ **E. B. Agyekum** // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 40. P. 100760. 0,56 п. л / 0,56 п. л (**Scopus, WoS**).
 19. **Agyekum E. B.** Optimization and techno-economic assessment of concentrated solar power (CSP) in South-Western Africa: A case study on Ghana/ **E. B. Agyekum**, V. I. Velkin // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 40. P. 100763. 0,94 п. л / 0,6 п. л (**Scopus, WoS**).
 20. **Agyekum E. B.** Feasibility study and economic analysis of stand-alone hybrid energy system for southern Ghana/ **E. B. Agyekum**, C. Nutakor // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 39. P. 100695. 0,75 п. л / 0,5 п. л (**Scopus, WoS**).
 21. **Agyekum E. B.** Sustainable energy: Is it nuclear or solar for African Countries? Case study on Ghana/ **E. B. Agyekum**, V. I. Velkin, I. Hossain // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 37. P. 100630. 0,69 п. л / 0,33 п. л (**Scopus, WoS**).
 22. **Agyekum E. B.** Effect of Solar Tracking on the Economic Viability of a Large-Scale PV Power Plant/ **E. B. Agyekum**, B. K. Afornu, M. N. S Ansah // Environmental and Climate Technologies. 2020. Vol. 24. P. 55–65. 0,69 п. л / 0,33 п. л (**Scopus, WoS**).
 23. **Агъекум Э.Б.** Evaluation of the techno-economic opportunities of PV/WIND/DG/BATTERY hybrid system for Yekaterinburg, Russia/ **Э.Б.Агъекум**, В.И. Велькин, С.Е. Щеклеин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2020. Vol. (28-30). P. 32-38. 0,5 п. л / 0,33 п. л
 24. Velkin, V.I. Optimization Of Energy Supply With Use Renewable Energy Sources based on A Cluster Approach / V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, **E. Agyekum** and P.K. Seepana // In Российские регионы в фокусе перемен. 2020. P. 478-481. 0,25 п. л / 0,1 п. л.
 25. **Agyekum E. B.** Comparative evaluation of renewable energy scenario in Ghana/ **E. B. Agyekum**, V. I. Velkin, I. Hossain // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. IOP Publishing, 2019. Vol. 643. P. 012157. 0,56 п. л / 0,33 п. л (**Scopus**).