

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ТАДЖИКИСТАНА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С.У.
УМАРОВА

На правах рукописи

УДК: 621.311.243



МАХМУДЗОДА БЕХРУЗ НОЗИР

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В
УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 2.3. Энергетика и электротехника
(2.3.3. Энергоустановки на основе возобновляемых
видов энергии)

Душанбе-2026

Диссертация выполнена в Центре исследования и использования возобновляемых источников энергии Физико-технического института имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Научный руководитель: – **Мадвалиев Умархон,**
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент Национальной академии наук Таджикистана, главный научный сотрудник ЦИИВИЭ ФТИ НАНТ

Официальные оппоненты: – **Ахатов Жасуржон Саидович** - доктор технических наук, профессор, заведующей Лаборатории солнечных тепловых и энергетических установок Физико-технического института имени С.А. Азимова АН Республики Узбекистан.

Назиров Хуршед Бобоходжаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики Филиала «НИУ МЭИ» в г. Душанбе.

Ведущая организация: – **Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими**

Защита диссертации состоится 12 марта 2026 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 6Д.КОА-055 при Физико-техническом институте им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана, по адресу: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Айни, 299/1, факс (+992-372)25- 79-14. Зал заседаний ученого совета ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана и на сайте www.phti.tj.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор философии (PhD)**

Каюмов М.М

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Энергетическое развитие Республики Таджикистан в течение последних десятилетий определяется сочетанием двух взаимосвязанных факторов: доминированием гидроэнергетики в структуре выработки и высокой чувствительностью генерации к сезонным колебаниям водных ресурсов. При всей значимости гидроэнергетического потенциала, составляющего основу национального энергобаланса, его циклический характер вызывает периоды ощутимого дефицита электрической мощности, что особенно проявляется в осенне-зимний период. Такая структура энергосистемы подчёркивает необходимость формирования резервных, независимых от гидрологических условий источников электроэнергии, способных повысить устойчивость энергоснабжения и снизить зависимость потребителей от сезонных режимов работы ГЭС.

В то же время природно-климатические условия Таджикистана благоприятствуют развитию солнечной энергетики. На значительной части территории страны суммарная солнечная радиация достигает величин, которые сопоставимы с регионами устойчивого развития фотоэлектрических систем. Наличие такого ресурса позволяет рассматривать использование солнечной энергии как одно из наиболее перспективных направлений снижения нагрузки на централизованную энергосистему. В особенности это касается городских условий, где рост потребления электроэнергии, уплотнение застройки и ограниченность площадей для наземных энергетических объектов требуют поиска решений, не затрагивающих землепользование. В этих условиях кровли зданий выступают как практически единственный крупный резерв, позволяющий обеспечить производство электроэнергии в

непосредственной близости от её потребления, минимизируя затраты на транспортировку и повышая эффективность энергосистемы.

Однако использование крыш зданий в качестве площадок для размещения фотоэлектрических установок требует обоснованной предварительной оценки их технической и экономической целесообразности. Эта задача осложняется отсутствием в Таджикистане детализированных пространственных данных: цифровых моделей поверхности (ЦМП) зданий, результатов лазерного сканирования и трёхмерных муниципальных кадастров, служащих основой большинства зарубежных методик. В результате применение распространённых в Европе и Северной Америке подходов становится невозможным без существенной адаптации к данным условиям. На национальном уровне отсутствуют также системные исследования геометрии крыш, закономерностей их ориентации, распределения затенённости и потенциальной площадки для установки солнечных модулей, что не позволяет судить о масштабах и структуре доступного ресурса.

Параллельно с этим очевидно недостаточное количество научных работ, посвящённых оценке эффективности фотоэлектрических установок, размещаемых на крышах зданий. Имеющиеся исследования в большей степени ориентированы на крупные наземные солнечные станции или носят обзорный характер, не учитывая специфику распределённой городской генерации. Таким образом, отсутствует целостная методология, объединяющая анализ пространственных данных, моделирование солнечной инсоляции, оценку затенённости, расчёт энергетических характеристик и экономическую оценку проекта с учётом национальных тарифных и эксплуатационных условий. Невозможность опереться на готовые инструменты делает

необходимым формированием собственной методики, учитывающей особенности географической среды, архитектурной застройки и энергетического сектора Таджикистана.

Разработка методики оценки пригодности крыш для размещения солнечных установок является важной не только с научной точки зрения, но и с позиции практических задач, стоящих перед государственными органами, муниципальными службами, проектными организациями и инвесторами. Запрос на объективную оценку распределённого солнечного потенциала усиливается в связи с переходом к политике повышения энергоэффективности зданий, формированием элементов «зелёной» экономики и расширением использования возобновляемых источников энергии в соответствии с долгосрочными стратегическими программами страны. Введение научно обоснованной методики позволяет систематизировать подход к оценке крышных поверхностей, определить структуру доступного ресурса, выявить наиболее перспективные зоны для размещения фотоэлектрических установок и тем самым сформировать основу для принятия управленческих решений.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью комплексного научного подхода к оценке эффективности фотоэлектрических установок, размещаемых на крышах зданий, при отсутствии детальных пространственных данных и при наличии значительных природных и урбанистических преимуществ, которые до настоящего времени не были системно исследованы. Создание такой методики обеспечивает возможность объективного анализа потенциала распределённой солнечной энергетики, способствует обоснованности инвестиционных решений и вносит вклад в формировании

политики развития возобновляемых источников энергии в Республике Таджикистан.

Степень разработанности научной проблемы. В мировой научной литературе разработано множество подходов к оценке крышного солнечного потенциала, основанных на применении геоинформационных систем, лидар-сканирования, трёхмерных городских и кадастровых моделей, а также высокоточных цифровых моделей поверхности. Комплексные ГИС-ориентированные модели городских энергетических систем и инструменты оптимизации подробно рассмотрены в работах А. Альхамви, В. Меджруби, Т. Фогта и К. Агерта [1]. Влияние пространственного городского контекста и трёхмерной застройки на потенциал солнечной генерации зданий с использованием 3Д-ГИС проанализировано Р. Машете, А. П. Фалканом, М. Г. Гомешем и А. М. Родригешем [2]. Систематизированный обзор современных ГИС-подходов к оценке крышного фотоэлектрического потенциала на городском уровне представлен в обзорной работе А. Гассара и С. Х. Ча [3]. Такие методы позволяют определять уклон, ориентацию и затенение с метрической точностью, обеспечивая расчёт эффективной площади крыши для солнечных панелей. Однако большинство исследований выполнялись для стран с высокоразвитыми геоинформационными инфраструктурами. Для государств с ограниченными картографическими данными сформировался отдельный подход, основанный на использовании открытых данных – векторных контуров зданий, глобальных моделей рельефа и спутниковых данных по солнечной радиации [4–7].

Несмотря на наличие отдельных исследований по солнечному потенциалу в Таджикистане отсутствуют комплексные работы, посвящённые оценке крышных СФЭС на уровне зданий. Существующие исследования

сосредоточены на региональном зонировании ВИЭ (ветровая и солнечная наземная станция), без детализации до уровня конкретных объектов [8]. Кроме того, до настоящего времени в научной литературе Таджикистана не разработаны методы определения ориентации крыш без лидар, моделирования междурядного затенения, интегральной оценки пригодности зданий.

Связь работы с научными программами, (проектами), темами. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетами, определёнными Национальной стратегией адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года, утверждённой Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 декабря 2016 года, № 626, где развитие возобновляемых источников энергии рассматривается как одно из ключевых направлений повышения устойчивости экономики к климатическим рискам. Работа согласуется с положениями Стратегии развития «зелёной» экономики в Республике Таджикистан на 2023-2037 годы, утверждённой Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 сентября 2022 года, № 482, в которой предусмотрены увеличение использования солнечной энергетики, повышение энергоэффективности и внедрение цифровых методов управления природными ресурсами, включая ГИС-технологии. Тематика диссертации находится в соответствии с задачами, обозначенными в Национальной водной стратегии Республики Таджикистан на период до 2040 года, утверждённой Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 29 ноября 2024 года, № 627, где подчёркивается необходимость диверсификации энергетического баланса, снижения нагрузки на водно-

энергетический комплекс и стимулирования развития альтернативной солнечной генерации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель исследования. Оценка эффективности крышных фотоэлектрических систем в условиях Таджикистана на основе геоинформационного анализа и моделирования солнечной инсоляции.

Задачи исследования:

1. Разработать алгоритм извлечения геометрических параметров крыш зданий (ориентация, полезная площадь) с использованием открытых пространственных данных и инструментов геоинформационного моделирования.
2. Построение модели оценки технического потенциала солнечных установок, размещаемых на крышах, включающей расчёт возможной установленной мощности, годовой выработки электроэнергии и энергетических параметров на основе многолетних спутниковых климатических данных.
3. Разработка методики комплексной технико-экономической оценки эффективности крышных солнечных установок, включающей расчёт себестоимости вырабатываемой электроэнергии, срока окупаемости, чистой приведённой стоимости.

Объект исследования: солнечные фотоэлектрические установки, размещённые на крышах зданий и их функционирование в условиях Таджикистана.

Предметом исследования являются энергетические, пространственные и экономические характеристики крышных фотоэлектрических систем, а также совокупность факторов, определяющих их эффективность при использовании геоинформационных методов в условиях Таджикистана.

Научная новизна исследования:

1. Разработан алгоритм автоматизированного определения полезной площади и ориентации крыш, с использованием метода минимального повернутого прямоугольника (Minimum Rotated Rectangle, MRR).
2. Предложена интегрированная методика геоинформационной оценки технического потенциала крыш для размещения солнечных энергетических установок, адаптированная к условиям отсутствия детализированных цифровых моделей поверхности зданий и к сложной горной местности Таджикистана.
3. Создана комплексная методика технико-экономического анализа эффективности крышных солнечных установок, включающая расчёт годовой выработки, себестоимости электроэнергии, срока окупаемости и построение интегральной классификации пригодности крыш на основе совокупности пространственных и экономических параметров.

Теоретическая и научно-практическая значимость.

Теоретическая значимость заключается в развитии научных представлений о методах геоинформационного анализа солнечного потенциала, моделировании пространственных характеристик зданий для оценки энергетической пригодности объектов. Работа формирует научную основу для применения геоинформационных методов в задачах распределённой энергетики при отсутствии детализированных пространственных данных.

Научно-практическая значимость отражается в возможности применения разработанных методик:

- при проектировании крышных солнечных установок для объектов различного назначения;
- при проведении энергетических обследований зданий;
- при формировании муниципальных и государственных программ развития распределённой генерации;

- при создании цифровых «солнечных кадастров»;
- в аналитических исследованиях международных проектов, связанных с развитием возобновляемых источников энергии;
- при подготовке инвестиционных решений и выборе наиболее перспективных районов.

Разработанная методика обладает возможностью масштабирования на уровень отдельных зданий, районов, городов и страны в целом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика геоинформационной оценки технического потенциала крыш зданий для размещения солнечных энергетических установок, основанная на автоматизированной обработке пространственных данных и моделировании солнечной инсоляции.
2. Модель расчёта установленной мощности и годовой выработки энергии крышными солнечными установками, учитывающая геометрию кровли, условия освещённости и климатические характеристики.
3. Методика комплексной технико-экономической оценки эффективности крышных солнечных установок, включающая расчёт экономических показателей и построение интегральной классификации пригодности кровель.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов определяется использованием в исследовании массивов климатических и пространственных данных, прошедших международную валидацию и имеющих установленную точность для территорий со сложным рельефом. Применённые алгоритмы геоинформационного моделирования основаны на общепринятых методах пространственного анализа и численного расчёта инсоляции, что обеспечивает воспроизводимость вычислений. Корректность расчётных величин

подтверждена их согласованием с фактическими показателями работы действующих солнечных установок, а также сопоставлением с независимыми источниками картографической информации. Проведён анализ чувствительности моделей к вариации входных параметров, что выявило устойчивость основных зависимостей. Апробация положений диссертационной работы на научных мероприятиях и экспертное обсуждение применённых методических подходов подтверждают обоснованность полученных выводов и соответствие их современным представлениям в области энергетических систем на основе возобновляемых ресурсов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема диссертационного исследования соответствует Паспорту номенклатуры специальностей ВАК при Президенте Республики Таджикистан по специальности 2.3 – Энергетика и электротехника (2.3.3 - Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии), в частности следующим пунктам:

2. Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов на базе возобновляемых видов энергии с целью оптимизации их параметров и режимов использования.

4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, информационного обеспечения для контроля и диагностики, оценки надежности оборудования, энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов в целом.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в формировании и обосновании методического подхода к оценке технического и экономического потенциала крышных фотоэлектрических установок на основе

геоинформационного анализа открытых пространственных данных, включая определение инсоляции, затенённости, ориентации кровель и расчёт ожидаемой выработки электроэнергии. Полученные алгоритмы, расчётные процедуры, результаты моделирования и все выводы, представленные в опубликованных статьях автора, выполнены им лично.

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены: на II Международной научно-технической конференции «Новые горизонты низкоуглеводного развития в Узбекистане» (25-26 сентября 2025 г.); на международной конференции «Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в Таджикистане» (23–25 июня 2025 г.); на Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития физических наук» (Худжанд, 2025 г.).

Публикации по теме диссертации. По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе: 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 1 статья в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Scopus, а также 4 статей в сборниках докладов и материалах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы. Объем работы составляет 144 страниц текста, включая 18 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 137 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приведены обоснование актуальности исследования, характеристика состояния энергетической системы Республики Таджикистан и необходимость развития распределённой солнечной генерации.

В первой главе диссертации проведён системный анализ современного состояния энергетической системы Республики Таджикистан, определяющей предпосылки для развития распределённой солнечной генерации. Показано, что доминирование гидроэнергетики в структуре выработки электроэнергии обуславливает выраженную сезонность энергоснабжения и приводит к дефициту мощности в осенне-зимний период, который усугубляется значительными потерями в электрических сетях. Одновременно природно-климатические условия страны – высокая инсоляция, большая продолжительность солнечного сияния и широкий диапазон благоприятных географических зон – создают объективный ресурс для развития крышных фотоэлектрических систем как элемента повышения надёжности энергоснабжения. Рассмотрена роль крышных фотоэлектрических систем в укреплении устойчивости энергосистемы: локальная выработка снижает сетевые потери, частично разгружает распределительные сети и повышает энергетическую автономность потребителей. Представлен обзор международных подходов к оценке солнечного потенциала крыш зданий, включая методы на основе лидарсканирования, трёхмерных градостроительных кадастров и высокоточных цифровых моделей поверхности. Показано, что прямое применение этих подходов в Таджикистане ограничено отсутствием лидар-данных и детализированных 3D-кадастров. В отдельном разделе приведены методы, применимые в странах с ограниченными пространственными данными: использование открытых геоданных (OSM, Microsoft Building Footprints), глобальных цифровых моделей рельефа, спутниковых и реанализационных данных по солнечной радиации. Отмечено, что такие источники позволяют выполнять первичные оценки технического потенциала крыш с

приемлемой точностью при их корректной обработке и валидации. По результатам главы сформулирована научная проблема исследования: необходимость разработки специализированной методики оценки технической и технико-экономической эффективности крышных фотоэлектрических систем, адаптированной к условиям Таджикистана и основанной на использовании доступных открытых пространственных данных и инструментов геоинформационного анализа.

Во **второй главе** диссертации изложена методика комплексной технико-экономической оценки эффективности крышных фотоэлектрических систем, адаптированная к условиям Республики Таджикистан и ориентированная на использование геоинформационных методов при ограниченности детализированных пространственных данных. В качестве основного источника информации использовались векторные контуры зданий из базы Microsoft Building Footprints, охватывающей территорию страны в пределах координат $67.3^{\circ} \leq \lambda \leq 75.3^{\circ}$, $36.5^{\circ} \leq \varphi \leq 41.1^{\circ}$. Для всех зданий были вычислены значения полной площади кровельной поверхности. Однако, учитывая инженерные ограничения (наличие мансард, вентиляционных конструкций и др.), принято, что только часть крыши может быть эффективно использована под солнечные панели. Допустимая доля полезной площади задаётся как:

$$A_{\text{полезная}} = A_{\text{крыши}} \times r_{\text{крыши}} \times k_{\text{затенения}}$$

где: $A_{\text{полезная}}$ – полезная площадь кровли, м²; $A_{\text{крыши}}$ – общая площадь кровли, м²; $r_{\text{крыши}}$ – коэффициент пригодности (принят равным 0.75); $k_{\text{затенения}}$ – поправка на междурядное расстояние (*).

Последний параметр (*) определяется на основе геометрии установки:

$$A_{\text{панели}} = L_{\text{панели}} \times \cos(\alpha) \times W_{\text{панели}}$$

где: $L_{\text{панели}}$ – длина панели (1.775 м), $W_{\text{панели}}$ – ширина панели (1.098 м), α – угол наклона панели (30°).

Зимний солнечный угол:

$$\theta_{\text{солнца}} = 90^\circ - \varphi - 23.5^\circ$$

где φ – широта района установки

Междурядное расстояние:

$$S_{\text{ряда}} = \frac{H}{\tan \theta_{\text{солнца}}}$$

Поправочный коэффициент на затенение:

$$k_{\text{затенения}} = \frac{A_{\text{панели}}}{A_{\text{панели}} + S_{\text{ряда}} \times W_{\text{панели}}} \quad (*)$$

Число устанавливаемых панелей:

$$N_{\text{панелей}} = \left\lfloor \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{панели}}} \right\rfloor$$

Ориентация плоскости крыши оказывает критическое влияние на энергетическую эффективность установки. В исследовании применён метод анализа главных компонент для определения доминирующего азимута крыши, исходя из пространственной геометрии.

Для каждого объекта вычислялся азимут $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$, где 0° соответствует северному направлению, а 180° – южному (оптимальному). Поправка на ориентацию рассчитывалась по формуле:

$$f_{\text{ориентации}} = \max(\cos(\theta - 180^\circ), f_{\text{мин}})$$

где: θ – азимут крыши в градусах, $f_{\text{мин}}$ – минимально допустимый коэффициент ориентации (принят 0.5).

Для оценки потенциала солнечной генерации использовались данные по годовому уровню солнечной радиации (PVOUT), полученные из спутникового источника SolarGIS. Каждый центр здания сопоставлялся с пикселем растра, что позволило получить величину R_{PVOUT}

– усреднённое годовое значение солнечной генерации на 1 кВт установленных панелей. Величины R_{PVOUT} отражают интегральный климатический потенциал конкретной географической локации, включая облачность, аэрозоли, альбедо и другие атмосферные параметры. Финальный расчёт параметров солнечной установки для каждого здания производился по следующим формулам:

Установленная мощность:

$$P_{установленная} = N_{панелей} \times P_{панели}$$

Годовая выработка электроэнергии:

$$E_{годовая} = P_{установленная} \times R_{PVOUT} \times f_{ориентации} \times \eta_{затенения}$$

где: $P_{панели}$ – номинальная мощность одной панели (0.4 кВт); $\eta_{затенения}$ – коэффициент затенения (0.95); $f_{ориентации}$ – поправка на ориентацию; R_{PVOUT} – годовой уровень солнечной генерации.

Экономический блок модели включает расчёт капитальных и эксплуатационных затрат на установку рифтоп-солнечной системы. Капитальные вложения определяются как произведение установленной мощности P_{total} и удельной стоимости инсталляции с учётом регионального корректирующего коэффициента. Формально это выражается следующим образом:

$$C_{капитальные} = P_{установленная} \cdot C_{удельная\ стоимость} \cdot \gamma$$

где $C_{удельная\ стоимость} = 820 \text{ USD/кВт}$ – базовая стоимость установки, $\gamma = 1,20$ – коэффициент, учитывающий дополнительные расходы (логистика, монтаж, административные процедуры).

Годовые эксплуатационные расходы включают техническое обслуживание и мониторинг оборудования. Они рассчитываются пропорционально установленной мощности:

$$C_{обслуживание} = P \cdot C_{удел.экспл.затраты}$$

где $C_{\text{удельные эксплуатационные затраты}} = 18$ долларов США/кВт/год – усреднённые годовые затраты на обслуживание.

Доход от эксплуатации рассчитывается как произведение объёма годовой генерации $E_{\text{годовая}}$ и фиксированного тарифа на электроэнергию:

$$R_{\text{годовая}} = E_{\text{годовая}} \cdot t$$

где $t = 0,032$ USD/кВт·ч – тариф, установленный для домохозяйств в Таджикистане. Чистая годовая прибыль определяется как разность между годовой выручкой и эксплуатационными расходами:

$$\Pi = R_{\text{годовая}} - C_{\text{удел.экспл.затраты}}$$

Для оценки инвестиционной привлекательности проекта используется показатель РР, определяемый как отношение полной стоимости установки к ежегодной чистой прибыли. При положительной прибыли срок окупаемости (РР) определяется по формуле:

$$PP = \frac{C_{\text{капитальные}}}{\Pi}$$

а в случае нерентабельности проекта (при $\Pi \leq 0$) РР считается бесконечным.

Другим ключевым показателем является чистая приведенная стоимость (ЧПС), которая отражает текущую ценность будущих доходов с учётом дисконтирования:

$$\text{ЧПС} = \Pi \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} - C_{\text{капитальные}}$$

где $r = 0,11$ – ставка дисконтирования, $n=25$ лет – срок эксплуатации установки. При положительном значении ЧПС проект считается экономически целесообразным.

Приведенная стоимость электроэнергии (ПСЭ) рассчитывается для оценки себестоимости производства одного киловатт-часа в течение всего срока службы

системы. При расчёте учитываются дисконтированные капитальные и эксплуатационные расходы, отнесённые к объёму генерации:

$$ПСЭ = \frac{C_{\text{капитальные}} \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-T}} + C_{\text{обслуживание}}}{E_{\text{годовая}}}$$

Этот показатель используется как базовый ориентир для сравнения с рыночным тарифом. Дополнительно в данной модели рассчитывается альтернативный вариант ПСЭ для сценария со снижением капитальных затрат на 20 % с целью оценки чувствительности инвестиционной модели.

В целях достижения рентабельности предлагается механизм стимулирующего тарифа (так называемого «зелёного тарифа»), устанавливаемого как процентное превышение над значением ПСЭ. В настоящем исследовании используется маржа в 15 %, отражающая нормативную прибыльность инвестора:

$$T_{\text{green}} = ПСЭ \cdot (1 + \delta)$$

где $\delta = 0,15$ – коэффициент маржи. Разница между стимулирующим тарифом и действующим тарифом на электроэнергию формирует тарифный разрыв:

$$\Delta T = T_{\text{green}} - t.$$

При положительном значении разрыва требуется государственное субсидирование, объём которого определяется следующим выражением:

$$S_{\text{subsidy}} = \max(0, \Delta T) \cdot E_{\text{годовая}}$$

Значения субсидий рассчитываются по каждому объекту и агрегируются на районном уровне. Эти данные используются для формирования рекомендаций по распределению государственной поддержки. Разработанная методика комплексной технико-экономической оценки была реализована с использованием геоинформационных технологий, что позволяет автоматизировать расчёты для

большого числа объектов и визуализировать результаты на картах (Рис. 1). В данном разделе описана архитектура алгоритма, структура созданного ГИС-модуля, а также особенности его применения для расчёта показателей по массиву зданий и формирования цифрового «солнечного кадастра» крыш. Алгоритм реализации методики можно разделить на несколько последовательных этапов (блоков), каждый из которых выполняется программно и интегрирован в единый процесс.

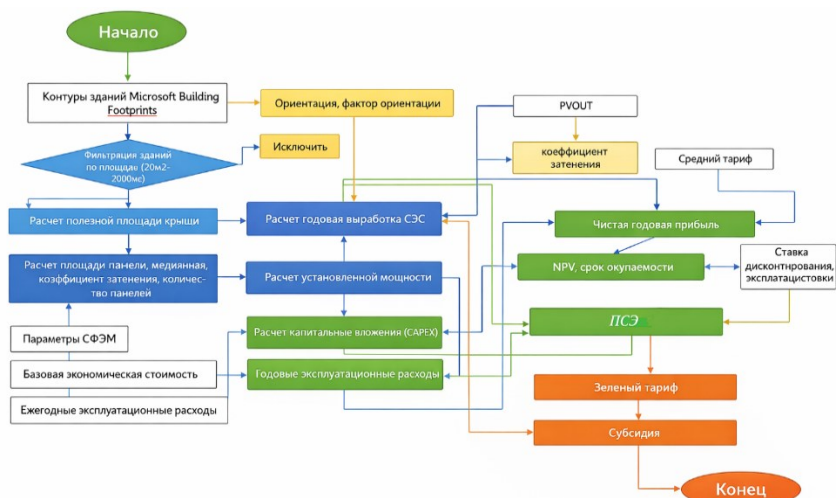


Рисунок 1. – Алгоритм геоинформационной реализации разработанной методики оценки солнечного потенциала крыш

В геоинформационной реализации методики все вышеперечисленные шаги выполнены в среде Python с использованием библиотек обработки геоданных, чтения растров PVOUT, вычислений, а также собственных скриптов для формул.

В третьей главе диссертации представлены результаты практического применения разработанной методики оценки эффективности крышных фотоэлектрических систем в условиях Республики Таджикистан. На основе

геоинформационного анализа выполнена оценка технического потенциала крышных фотоэлектрических систем по административным районам страны. Установлено, что расчётная среднегодовая выработка электроэнергии составляет 1400–1700 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности, при этом коэффициент использования установленной мощности находится в диапазоне 0,16–0,20. Обобщённые технико-экономические показатели по регионам представлены в таблице 1, а пространственное распределение технического потенциала крышных фотоэлектрических систем показано на рисунке 2.

Таблица 1. - Основные технико-экономические показатели крышных фотоэлектрических систем по административным районам Республики Таджикистан

Область	Район или город	Общая мощность, МВт	Годовая генерация, ГВт·ч	ПСЭ в базовом сценарии	Количество зданий	ПСЭ со снижением капитальных затрат на 20 %
РРП	Файзабад	624,5	567,3	0,036	41494	0,033
	Гиссар	2078,8	2002,1	0,035	137286	0,032
	Лахш	3,5	3005,7	0,038	302	0,035
	Нуробод	397,6	349,9	0,038	34707	0,035
	Рашт	1013,1	845,4	0,04	82241	0,036
	Рогун	365,5	312,7	0,038	28175	0,035
	Рудаки	3537,6	3229,1	0,036	243596	0,033
	Шахринав	1587,8	1504,8	0,036	108449	0,033
	Сангвор	54,8	42,7	0,042	5328	0,038
	Таджикабад	205,4	163,7	0,041	18542	0,038
	Турсунзаде	2088,4	1869,3	0,036	137861	0,033
	Вахдат	2066,9	1885,5	0,036	134020	0,033
Варзоб	1087,7	999,4	0,036	81913	0,033	
	Душанбе	3271,8	3028,8	0,036	191261	0,033
ГБАО	Ишкашим	13,8	12,2	0,037	1129	0,034
	Мургаб	11,3	11,8	0,032	872	0,029
	Рошткала	67,1	59,3	0,037	3717	0,034

продолжение таблицы 1

Область	Район или город	Общая мощность, МВт	Годовая генерация, ГВт·ч	ПСЭ в базовом сценарии	Количество зданий	ПСЭ со снижением капитальных затрат на 20 %
ГБАО	Рушан	17,4	15	0,039	1738	0,036
	Шугнан	142,1	125	0,038	7909	0,035
	Ванч	16,4	12,9	0,041	1578	0,037
Хатлонская область	Балджувон	149,3	133,7	0,036	13072	0,033
	Кушониён	2380,5	2058,4	0,038	156600	0,035
	Дангара	1168,1	1053,9	0,037	93337	0,033
	Фархор	1217,4	1083	0,037	89928	0,034
	Дусти	14,8	14,4	0,035	1224	0,032
	Джومي	1283,6	1156,7	0,037	100975	0,034
	Ховалинг	341,2	311,1	0,036	25190	0,033
	Хуросон	1132,3	997,8	0,037	91261	0,034
	Хамадони	95,8	79,6	0,039	6885	0,035
	Муинобод	12,9	11,3	0,037	1160	0,034
	Нурек	457,5	428,3	0,036	33704	0,033
	Н. Хусрав	385,9	326,8	0,038	31890	0,035
	Пяндж	781,2	659,4	0,039	58919	0,035
	Кабодиён	604,9	523,2	0,037	42042	0,034
	Джайхун	437,1	404,1	0,036	25076	0,033
	Леваканд	350,3	290,8	0,038	26875	0,035
	Шахритус	1328,1	1198,6	0,036	100016	0,033
	Темурмалик	538,2	497,3	0,035	42437	0,033
Вахш	401,5	363	0,036	33838	0,033	
Восё	602,7	536,9	0,037	39437	0,034	
Яван	1593,9	1500,6	0,035	124430	0,032	
Согдийская область	Ашт	1466,1	1219,8	0,039	121575	0,036
	Айни	510,3	475,4	0,037	40782	0,033
	Б. Гафуров	5271	4317,8	0,04	316271	0,037
	Деваштич	527,1	455,8	0,038	32074	0,035
	Исфара	2465,7	1969,2	0,041	166773	0,037
	Истаравшан	1023,6	916,8	0,037	57634	0,034
	Джаббор Расулов	1275,3	1077,2	0,039	69156	0,036
	Канибадам	2095	1680,5	0,041	131052	0,037

продолжение таблицы 1

Согдийская область	Район или город	Общая мощность, МВт	Годовая генерация, ГВт·ч	ПСЭ в базовом сценарии	Количество зданий	ПСЭ со снижением капитальных затрат на 20 %
Согдийская область	Горная Матча	58,5	49,6	0,04	5604	0,037
	Матча	1144,2	1023	0,038	79523	0,034
	Пенджикент	2287,4	2295,6	0,035	130123	0,032
	Шахристон	378,1	352,6	0,036	27050	0,033
	Спитамен	1336,6	1168,9	0,039	73999	0,035
	Зафарабад	206,3	179,6	0,038	12074	0,035
Итого/Среднее		53974	47850,8	0,039	3664104	0,036

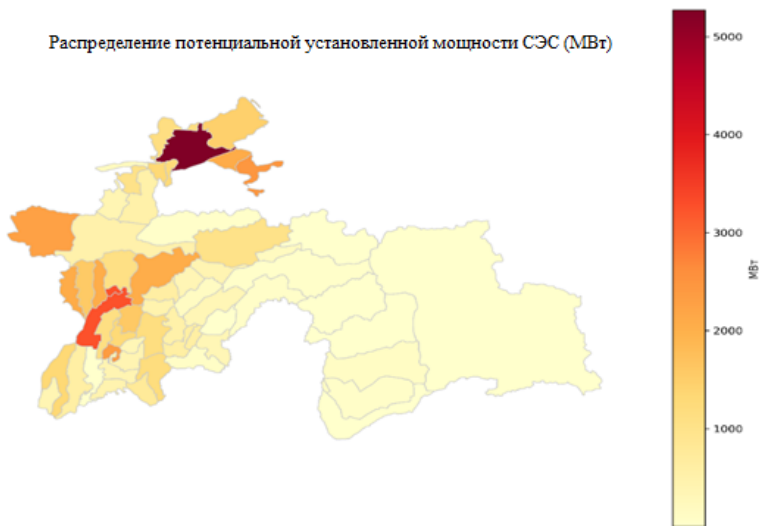


Рисунок 2. – Пространственное распределение потенциальной установленной мощности (МВт) по районам

Выполнена оценка потенциала использования солнечной энергии для различных типов зданий в городе Душанбе, включая жилые, промышленные, социальные, деловые здания и объекты иного назначения. В рамках исследования

не рассматривались здания барачного типа и малоэтажные индивидуальные жилые дома, большинство которых подлежат сносу в среднесрочной перспективе (таблица 2). Сравнительный анализ стран Центральной Азии показал, что технико-экономические показатели крышных фотоэлектрических систем в Таджикистане сопоставимы с аналогичными показателями соседних стран и в ряде случаев превосходят их за счёт более высокого уровня солнечной радиации.

Таблица 2. – Потенциальная установленная мощность и годовая выработка для г. Душанбе

Тип здания	Потенциальная установленная мощность (МВт)	Потенциальная годовая выработка (ГВт·ч)
Офисные здания	2,6	3,7
Новые жилые здания	66,5	95,8
Больницы	4,2	6,1
Детские сады	6,1	8,8
Школы	19,5	28,1
Старые жилые дома без лифта	60,4	86,9
Старые жилые дома с лифтом	8,3	11,9
Гостиницы	1,6	2,3
Государственные учреждения	11,1	15,9
Университеты	12,6	18,2
Промышленные объекты	80	115,1
Торговые центры	3,9	5,6
Рестораны	1,1	1,5
АЗС	0,5	0,7
Автопарки, вокзалы, такси	7,8	11,2
Спортивные комплексы	0,3	0,4
Неизвестно	2,9	4,2
Рынки	21,3	30,6
Итого	310,7	447
Неизвестно	2,9	4,2
Рынки	21,3	30,6
Итого	310,7	447

Экспериментальная валидация влияния угла наклона фотоэлектрических модулей показала, что отклонение от оптимального значения на 10° - 15° приводит к снижению годовой выработки не более чем на 5–8 %, что подтверждает допустимость использования конструктивно обусловленных углов наклона крыш. Данная зависимость представлена на рисунке 3.

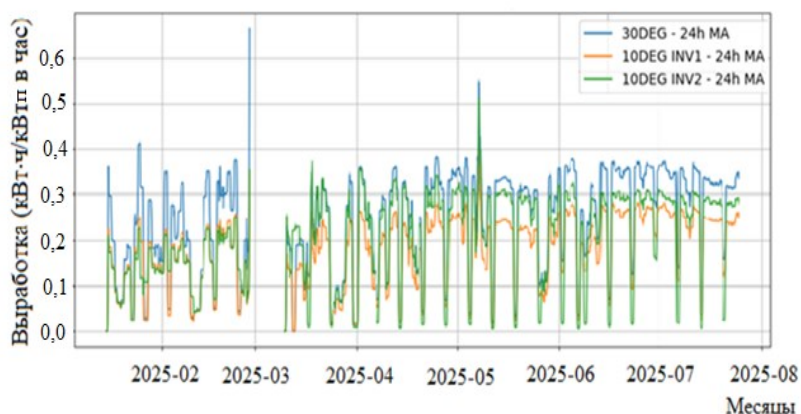


Рисунок 3. – Временной ряд 24-часового скользящего среднего удельной выработки трёх подсистем (30° , 10° INV1, 10° INV2)

Результаты этого исследования полностью соответствуют теоретическим ожиданиям, полученным на основе геометрии падения солнечных лучей. Полученные результаты подтверждают техническую и экономическую целесообразность внедрения крышных фотоэлектрических систем в условиях Республики Таджикистан и демонстрируют применимость разработанной методики для оценки потенциала распределённой солнечной генерации на уровне зданий, городов и регионов.

ВЫВОДЫ

1. Проведённая ГИС-оценка подтвердила, что методика, основанная на открытых данных (OSM и Microsoft Building Footprints), обеспечивает достаточную точность определения пригодной площади кровель и потенциала выработки в условиях отсутствия лидара и 3D-кадастров, что делает её применимой для регионального и муниципального энергетического планирования [1–А, 2 – А, 3–А, 4–А, 5–А].
2. Пространственно-геоинформационный анализ позволил отобрать 3664104 здания с пригодной площадью крыши более 20 м². Совокупный технический потенциал крышных фотоэлектрических систем в Республике Таджикистан составляет 53,97 ГВт установленной мощности и 47,85 млрд кВт·ч расчётной годовой генерации [3–А, 8–А].
3. Детализированное исследование по городу Душанбе показало, что для 3880 зданий суммарная площадь крыш составляет 4,27 км², из которых 3,10 км² признаны пригодными для размещения СФЭС (то есть ≈73% от базовой площади). Соответствующий технический потенциал оценивается в 310,7 МВт установленной мощности и 447 ГВт·ч годовой выработки при рациональной компоновке панелей [4 –А, 7–А].
4. Расчёт ПСЭ по административным районам показал, что в базовом сценарии значения ПСЭ лежат в интервале 0,032–0,042 долларов США/кВт·ч, при этом для большинства районов – 0,035–0,040 долларов США/кВт·ч, что сопоставимо или выше действующего тарифа 0,032 долларов США/кВт·ч для населения. Разброс ПСЭ между районами составляет ΔПСЭ ≈ 0,010 долларов США/кВт·ч, а максимальный тарифный разрыв (ПСЭ минус действующий тариф)

достигает 0,016 долларов США/кВт•ч, то есть до 31% и более относительно базового тарифа [1–А, 2–А].

5. В сценарии снижения капитальных затрат на 20% средние значения ПСЭ по районам уменьшаются до 0,029–0,038 долларов США/кВт•ч, а абсолютное снижение ПСЭ составляет 0,003–0,004 долларов США/кВт•ч по сравнению с базовым сценарием. Однако даже при таких параметрах ни один район не демонстрирует положительной чистой приведённой стоимости, что указывает на недостаточность одного только удешевления оборудования [1–А, 2–А].
6. Альтернативный сценарий с повышением тарифа на электроэнергию от ФЭС до 0,045 долларов США/кВт•ч показывает, что 83,6% объектов становятся рентабельными, что подтверждает ключевую роль тарифной политики и механизмов «зелёного тарифа» в раскрытии экономического потенциала крышных ФЭС. Даже при учёте снижения капитальных затрат устойчивое внедрение распределённой солнечной генерации в Таджикистане требует комплексной многоуровневой поддержки: тарифных стимулов, субсидий на капитальные затраты, налоговых льгот и долгосрочных гарантий выкупа электроэнергии [1–А, 2–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов исследования

1. Использовать разработанную методику при планировании развития распределённой солнечной энергетики на национальном и региональном уровнях, включая оценку технического и экономического потенциала крышных фотоэлектрических систем.
2. Рекомендовать органам государственного управления и муниципалитетам применение «солнечного кадастра» зданий для обоснования программ поддержки крышных

систем и выбора приоритетных объектов для пилотных проектов.

3. Применять методику проектными и инженерными организациями для предварительных технико-экономических расчётов (установленная мощность, годовая генерация, ПСЭ, срок окупаемости) при разработке систем на крышах жилищного фонда, социальных объектов и коммерческих зданий.
4. Использовать результаты экономического анализа при формировании стимулирующих механизмов (тарифы, субсидии, компенсации), обеспечивающих рентабельность внедрения крышных фотоэлектрических установок.
5. Применять методику в архитектурно-строительной практике, включая проектирование новых энергоэффективных зданий с заранее предусмотренной возможностью интеграции солнечных модулей на кровлю.

Список литературы

1. Alhamwi A., Medjroubi W., Vogt T., Agert C. GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas // *Applied Energy*. 2017. Vol. 191. P. 1–9.
2. Machete R., Falcao A. P., Gomes M. G., Rodrigues A. M. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 177. P. 290–302. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.064.
3. Gassar A. A. A., Cha S. H. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales // *Applied Energy*. 2021. Vol. 291. P. 116817.
4. Schallenberg-Rodriguez J. Photovoltaic techno-

- economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. P. 219–239. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.078.
5. Byrne J., Taminiu J., Kurdgelashvili L., Kim K. N. A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 830–844. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.023.
 6. Izquierdo S., Rodrigues M., Fueyo N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations // *Solar Energy*. 2008. Vol. 82. P. 929–939. DOI: 10.1016/j.solener.2008.03.007.
 7. Groppi D., Santoli L.-D., Cumo F., Garcia A. A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 40. P. 546–558. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.005.
 8. Akash J., Kudusov M., Akanksha J., Pramod J., Madvaliev U. A multicriteria approach to identifying and developing renewable energy zones in Tajikistan // *Applied Solar Energy*. 2023. Vol. 59, No. 2. P. 176–188.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Статьи в журналах, индексируемые в международной базе данных Scopus:

[1-A] **B. N. Mahmudov**. Scalable Assessment of Rooftop Solar Potential in Central Asia using Open Data and Geometric Orientation Analysis [Текст] / U. Madvaliev, B. N. Mahmudov, A. R. Rustamzoda, M. A. Kudusov & R. Bakhromzod // *Applied*

Solar Energy. - 2025. Vol. 61. P. 206–215. DOI: 10.3103/S0003701X25601280.

**2. Статьи, опубликованные в других изданиях,
рекомендуемых ВАК при Президенте Республики
Таджикистан:**

[2-А] **Махмудов Б.Н.** Оценка экономического потенциала крышных-солнечных установок в Таджикистане на основе открытых пространственных данных и мультикритериального подхода [Текст] / Махмудов Б.Н. Мадвалиев У., Кудусов М.А., Рустамзода А.Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана. -2025, том 68, - №6 – С. 566-577, ISSN 2791-1489

[3-А] **Махмудов Б.Н.** Оценка технического потенциала крышных-солнечных установок в Таджикистане на основе открытых пространственных данных и мультикритериального подхода [Текст] /Махмудов Б.Н., Мадвалиев У., Кудусов М.А., Рустамзода А.Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана. -2025, том 68, - №5. – С. 452-463, ISSN 2791-1489.

[4-А] **Махмудов Б.Н.** Оценка потенциала солнечной энергии при установке фотоэлектрических панелей на крышах зданий города Душанбе / Мадвалиев У., Кудусов М.А., Махмудов Б.Н., Бахромзод Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана. - 2025, том 68, – №2. – С. 131-141, ISSN 2791-1489

**3. Список опубликованных работ в материалах
международных конференций:**

[5-А] **Махмудов Б.Н.** Влияние угла наклона фотоэлектрического модуля на выработку электроэнергии: исследование на примере крыши в северном Таджикистане [Текст] / Махмудов Б.Н., А. Давлатов // “Новые горизонты низкоуглеводного развития и в Узбекистане”, II Международная научно-техническая конференция. 25-26 сентября - 2025, – С. 32-36.

[6-А] **Махмудов Б.Н.** Сезонное влияние угла наклона фотоэлектрических модулей на выработку энергии в зимнее время: исследование на примере крыш в Таджикистане [Текст] / Махмудов Б.Н., А. Давлатов // Труды международной конференции, «Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в Таджикистане». 23-25 июня 2025 г. – С. 143-147.

[7-А] **Махмудов Б.Н.** Исследование возможностей использования солнечной энергии для установки фотоэлектрических панелей на крышах зданий Душанбе [Текст] / Махмудов Б.Н., Бахромзод Р. // Проблемы и перспективы развития физических наук: материалы международной научно-практической конференции. г. Худжанд: Дабир, – 2025. – С. 420–424.

[8-А] **Махмудов Б.Н.** Оценка технического потенциала рифтоб-солнечных установок в Таджикистане на основе данных Microsoft building footprints и openstreetmap [Текст] / Махмудов Б.Н., Мадвалиев У., Зарифзода А., Рустамзода А.Р., Бахромзод Р., Кудусов М.А // “Новые горизонты низкоуглеводного развития в Узбекистане”, II Международная научно-техническая конференция. 25-26 сентября – 2025, – С. 109-113.

АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҲОИ ТОҶИКИСТОН
ИНСТИТУТИ ФИЗИКАЮ ТЕХНИКАИ ба номи С. У.
УМАРОВ

Бо ҳуқуқи дастнавис

ВБД: 621.311.243



МАҲМУДЗОДА БЕҲРҮЗ НОЗИР

**БАҲОДОДИИ САМАРАНОКИИ НИЗОМҲОИ
ФОТОЭЛЕКТИКИИ ДАР БОЛОИ БОМ
НАСБШАВАНДА ДАР АСОСИ НИЗОМҲОИ
ГЕОИНФОРМАТСИОНӢ ДАР ШАРОИТИ
ТОҶИКИСТОН**

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи
илмии номзади илмҳои техникӣ
аз рӯи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника
(2.3.3. Дастгоҳҳои энергетикӣ дар асоси намудҳои
барқароршавандаи энергия)

Душанбе-2026

Диссертатсия дар Маркази омӯзиш ва тадқиқи манбаъҳои барқароршавандаи энергияи Институти физикаю техникаи ба номи С. У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон омода гардидааст.

Рохбари илмӣ: – **Мадвалиев Умархон,**
доктори илмҳои физикаю математика, узви вобастаи АМИТ, сарҳодими МОТМБЭ ИФТ АМИТ

Муқарризони расмӣ: – **Ахатов Ҷасурҷон Саидович** – доктори илмҳои техникаӣ, профессор, мудири Озмоишгоҳи дастгоҳҳои офтобӣ, ҳароратӣ ва энергетикаи Институти физикаю-техникаи ба номи С.А. Азимови АИ Ҷумҳурии Узбекистон

Назиров Хуршед Бобохоҷаевич – номзади илмҳои техникаӣ, дотсент, мудири кафедраи электроэнергетикаи Филиали «Донишгоҳи миллии таҳқиқотӣ Донишкадаи энергетикаи Москва» дар ш. Душанбе

Муассисаи пешбар: – **Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ**

Ҳимояи диссертатсия санаи 12 марти соли 2026 соати 15⁰⁰ дар ҷаласаи шурои диссертатсионии 6D.KOA-055 назди Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон баргузор мегардад. Суроға: 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёбони Айнинӣ, 299/1, факс (+992-372) 25-79-14. Толори шурои олимони ИФТ ба номи С.У.Умарови АМИТ. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

Бо матни пурраи диссертатсия дар китобхонаи Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон ва дар сомонии www.phti.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат санаи «__» _____ соли 2026 ирсол гардидааст

Котиби илмӣ
шурои диссертатсионӣ,
доктори фалсафа (PhD)

Каюмов М.М

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзуи (предмет) таҳқиқот. Рушди энергетикаи Ҷумҳурии Тоҷикистон дар даҳсолаҳои охир бо омезиши ду омили ба ҳам вобаста муайян мегардад: бартарияти гидроэнергетика дар сохтори истеҳсоли неруи барқ ва ҳассосияти баланди тавлидот ба тағйирёбиҳои мавсимии захираҳои обӣ. Бо вучуди аҳамияти калони иқтисодии гидроэнергетикӣ, ки пояи тавозуни миллии энергетикиро ташкил медиҳад, хусусияти даврии он ба ба вучуд омадани давраҳои норасоии қобили мулоҳизаи қувваи барқ оварда мерасонад, ки ин ҳолат махсусан дар давраи тирамоҳу зимистон равшан зоҳир мегардад. Чунин сохтори низоми энергетикӣ зарурати ташаккули манбаъҳои захиравӣ ва мустақил аз шароити гидрологиро таъкид мекунад, ки метавонанд устувории таъминоти неруи барқро баланд бардошта, вобастагии истеъмолкунандагонро аз режими мавсимии қори неругоҳҳои барқӣ обӣ коҳиш диҳанд.

Ҳамзамон, шароити табиӣ-иқлимӣ Тоҷикистон барои рушди энергетикаи офтобӣ мусоид мебошанд. Дар қисми зиёди қаламрави кишвар сатҳи ҷамъии радиатсияи офтобӣ ба киматҳои мерасад, ки бо минтақаҳои дорой рушди устувори низомҳои фотоэлектрикӣ қобили муқоисаанд. Мавҷудияти чунин захира имкон медиҳад, ки истифодаи энергияи офтобӣ ҳамчун яке аз самтҳои умедбахши коҳиш додани сарборӣ ба низоми марказонидашудаи энергетикӣ баррасӣ гардад. Ин масъала, махсусан, барои муҳити шаҳрӣ аҳамияти хос дорад, зеро афзоиши истеъмоли неруи барқ, зичшавии сохтмон ва маҳдуд будани майдонҳо барои ҷойгиркунии иншооти энергетикӣ рӯизаминӣ зарурати ҷустуҷӯи роҳҳои ба миён меорад, ки ба истифодаи замин таъсири манфӣ нарасонанд. Дар чунин шароит, бомҳои биноҳо ҳамчун қариб ягона захираи бузург баромад мекунанд, ки имкони истеҳсоли неруи барқро бевосита дар наздикии маҳалли истеъмол фароҳам оварда, хароҷоти интиқолро ба ҳадди ақал

расонида ва самаранокии умумии низоми энергетикиро баланд мебардоранд.

Бо вучуди ин, истифодаи бомҳои биноҳо ҳамчун майдон барои ҷойгиркунии таҷҳизоти офтобии фотоэлектрикӣ арзёбии пешакии асосноки мувофиқати техникаю иқтисодии онҳоро тақозо мекунад. Иҷрои ин вазифа дар шароити Тоҷикистон бо сабаби набудани маълумоти муфассали фазой мушкил мегардад, аз ҷумла моделҳои рақамии сатҳи биноҳо, натиҷаҳои ҷенкунии лазерӣ ва феҳристҳои сеченакаи шахрӣ, ки пояи аксари усулҳои таҳияшуда дар кишварҳои хоричиро ташкил медиҳанд. Дар натиҷа, татбиқи усулҳои маъмул, ки дар Аврупо ва Амрикои Шимолӣ васеъ истифода мешаванд, бидуни мутобиқсозии ҷиддӣ ба шароити иттилоотӣ ва фазоии мавҷуда ғайриимкон мебошад. Ҳамзамон, дар сатҳи миллии таҳқиқоти низомманд оид ба шаклу андозаи бомҳо, қонуниятҳои самтгирии онҳо, тақсимои сояфканӣ ва муайян намудани масоҳати эҳтимолии барои насби панелҳои офтобӣ мувофиқ анҷом дода нашудаанд, ки ин ҳолат имкон намедиҳад микёс ва сохтори захираи воқеан дастрас ба таври бозьтимод арзёбӣ карда шавад.

Ҳамзамон, норасоии ошкори корҳои илмӣ, ки ба арзёбии самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ, ҷойгиршуда дар бомҳои биноҳо бахшида шудаанд, ба назар мерасад. Таҳқиқотҳои мавҷуда бештар ба неругоҳҳои калони офтобии рӯизаминӣ равона гардидаанд ӯ хусусияти умумӣ доранд ва хусусиятҳои хоси тавлиди тақсимшудаи шахриро ба инобат намегиранд.

Дар натиҷа, методологияи мукаммале, ки таҳлили маълумоти фазой, моделсозии афтиши энергияи офтобӣ, арзёбии сояфканӣ, ҳисобкунии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва таҳлили иқтисодии лоиҳаро бо дарназардошти шароити миллии тарифӣ ва истифодабарӣ муттаҳид созад, мавҷуд нест. Имкони таъя кардан ба абзорҳои тайёри мавҷуда набуданаш зарурати ташаккули методикаи мустақилро ба миён меорад, ки хусусиятҳои муҳити

чуғрофӣ, сохтори меъмории биноҳо ва вижагиҳои соҳаи энергетикаи Тоҷикистонро ба таври ҳамачониба ба ҳисоб гирад.

Таҳияи методикаи арзёбии мувофиқати бомҳо барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои офтобӣ на танҳо аз нуқтаи назари илмӣ аҳамияти муҳим дорад, балки аз ҷиҳати ҳаллу фасли масъалаҳои амалӣ низ, ки дар назди мақомоти давлатӣ, сохторҳои коммуналӣ, ташкилотҳои лоиҳакашӣ ва сармоягузoron қарор доранд, бисёр муҳим мебошад. Талабот ба арзёбии объективии потенциали офтобии тақсимшуда дар заминаи гузариш ба сиёсати баланд бардоштани самаранокии энергетикаи биноҳо, ташаккули унсурҳои иқтисоди «сабз» ва густариши истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия мувофиқи барномаҳои стратегияи дарозмуддати кишвар тақвият меёбад. Ҷорӣ намудани методикаи илмӣ асоснокшуда имкон медиҳад, ки равиши арзёбии сатҳҳои бомӣ ба низом дароварда шавад, сохтори захираи дастрас муайян гардад, минтақаҳои аз ҳама умедбахш барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ ошкор карда шаванд ва бо ин роҳ заминаи бозътимод барои қабули қарорҳои идоракунӣ фароҳам оварда шавад.

Ҳамин тариқ, аҳамияти мавзуи таҳқиқот бо зарурати татбиқи равиши мукаммали илмӣ ба арзёбии самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ, ки дар бомҳои биноҳо ҷойгир мегарданд, муайян карда мешавад, дар шароите ки маълумоти муфассали фазой маҳдуд буда, ҳамзамон бартариҳои назарраси табиӣ ва шахрсозӣ мавҷуданд, ки то имрӯз ба таври низомманд таҳқиқ нашудаанд. Таҳияи чунин методика имконияти таҳлили объективии потенциали энергетикаи офтобии тақсимшударо таъмин намуда, ба асоснокии қарорҳои сармоягузорӣ мусоидат мекунад ва дар ташаккули сиёсати рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар Ҷумҳурии Тоҷикистон саҳми назаррас мегузорад.

Дарачаи таҳқиқи мавзуи илмӣ. Дар адабиёти илмии ҷаҳонӣ равишҳои сершумор барои арзёбии потенциали офтобии бомҳо таҳия гардидаанд, ки бар пояи истифодаи низомҳои иттилоотии ҷуғрофӣ, ҷенкунии лазерии масофавӣ, моделҳои сеченакаи шаҳрӣ ва кадастрӣ, инчунин моделҳои рақамии дақиқи сатҳ асос меёбанд. Моделҳои мураккаби ба ГИС таъҷардаи низомҳои энергетикӣ шаҳрӣ ва абзорҳои беҳсозӣ ба таври муфассал дар корҳои А. Алҳамвӣ, В. Меджрубӣ, Т. Фогт ва К. Агерт баррасӣ шудаанд [1].

Таъсири муҳити фазоии шаҳрӣ ва сохтмони сеченака ба потенциали тавлиди офтобии биноҳо бо истифода аз ГИС-и сеченака аз ҷониби Р. Машете, А. П. Фалкан, М. Г. Гомеш ва А. М. Родригеш таҳлил гардидааст [2]. Баррасии низомманд ва ҷамъбастии равишҳои муосири ГИС барои арзёбии потенциали фотоэлектрикӣ бомҳо дар сатҳи шаҳрӣ дар қори бознигарии А. Гассар ва С. Ҳ. Ча пешниҳод шудааст [3].

Ин гуна усулҳо имкон медиҳанд, ки нишебӣ, самтгирӣ ва сояфканӣ бо дақиқии метрӣ муайян карда шуда, масоҳати самараноки бом барои насби панелҳои офтобӣ ҳисоб карда шавад. Бо вучуди ин, аксари ҷунин таҳқиқот барои кишварҳои анҷом дода шудаанд, ки дорои инфрасохтори хеле рушдёфтаи иттилоотӣ ҷуғрофӣ мебошанд. Барои давлатҳои, ки дорои маълумоти маҳдуди харитасозӣ мебошанд, равиши ҷудогона ташаккул ёфтааст, ки ба истифодаи додаҳои қушода – контурҳои векторӣ биноҳо, моделҳои глобалии релеф ва додаҳои моҳворавӣ оид ба радиатсияи офтобӣ таъҷ мекунад [4–7].

Бо вучуди мавҷуд будани баъзе таҳқиқот оид ба потенциали офтобӣ дар Тоҷикистон, корҳои мукаммале, ки ба арзёбии низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ дар сатҳи биноҳои алоҳида бахшида шуда бошанд, то имрӯз анҷом дода нашудаанд. Таҳқиқотҳои мавҷуда асосан ба зониркунии минтақавӣ манбаъҳои барқароршавандаи энергия (неругоҳҳои офтобии рӯизаминӣ ва бодӣ) равона гардида, ба сатҳи объектҳои мушаххас тафсил дода

намешаванд [8]. Илова бар ин, то имрӯз дар адабиёти илмии Тоҷикистон усулҳои муайян намудани самтгирии бомҳо бидуни истифодаи ченкунии лазерии масофавӣ, моделсозии сояфкании байниқатории панелҳои офтобӣ, инчунин арзёбии ҳамгироёнаи мувофиқати биноҳо барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ ба таври низомманд таҳия нагардидаанд.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо), мавзӯҳои илмӣ. Таҳқиқоти диссертатсионӣ мутобиқи афзалиятҳои анҷом дода шудааст, ки дар Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон то соли 2030, ки бо Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 1 декабри соли 2016, № 626 тасдиқ шудааст, муайян гардидаанд. Дар ин санад рушди энергетикаи барқароршаванда, баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва рақамгардонии идоракунии захираҳо ҳамчун самтҳои калидии муосиргардонии бахши энергетикӣ муайян карда шудаанд. Кор бо муқаррароти Стратегияи рушди иқтисоди «сабз» дар Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2023–2037, ки бо Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 30 сентябри соли 2022, № 482 тасдиқ шудааст, мувофиқат мекунад. Дар ин ҳуҷҷат густариши истифодаи энергетикаи офтобӣ, баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва ҷорӣ намудани усулҳои рақамии идоракунии захираҳои табиӣ, аз ҷумла технологияҳои системаи иттилоотии географӣ, пешбинӣ гардидааст, ки комилан ба равиши методологии ин таҳқиқот мувофиқ мебошад. Мавзӯи диссертатсия бо вазифаҳои, ки дар Стратегияи миллии оби Ҷумҳурии Тоҷикистон то соли 2040, тасдиқшуда бо Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 29 ноябри соли 2024, № 627, муайян шудаанд, мувофиқат дорад. Дар ин санад зарурати диверсификатсияи тавозуни энергетикӣ, коҳиши фишор ба маҷмааи обуэнергетикӣ ва ҳавасмандгардонии рушди манбаъҳои алтернативии энергетика, аз ҷумла генератсияи офтобӣ, таъкид мегардад, ки муҳим будани арзёбии потенциали

системаҳои фотоэлектрии болои биноҳоро барои расидан ба ҳадафҳои стратегӣ асоснок менамояд.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот. Арзёбии самаранокии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ дар шароити Тоҷикистон дар асоси таҳлили иттилоотию чуғрофӣ ва моделсозии афтиши энергияи офтобӣ.

Вазифаҳои таҳқиқот;

1. Таҳия намудани алгоритми чудосозӣ ва муайянсозии параметрҳои геометрии бомҳои биноҳо (нишебӣ, самтгирӣ, масоҳати муфид, дараҷаи сояафканӣ) бо истифода аз додаҳои фазоии кушода ва абзорҳои моделсозии иттилоотию чуғрофӣ.
2. Сохтани модели арзёбии иқтидори техникии дастгоҳҳои офтобӣ, ки дар бомҳо ҷойгир мешаванд, бо дарбаргирии ҳисобкунии иқтидори насбшавандаи эҳтимолӣ, тавлиди солонаи неруи барқ ва нишондиҳандаҳои энергетикӣ дар асоси додаҳои моҳворавии иқлимии бисёрсола.
3. Таҳия намудани методикаи арзёбии маҷмуии техникию иқтисодии самаранокии дастгоҳҳои офтобии бомӣ, бо дарбаргирии ҳисобкунии арзиши аслии неруи барқи тавлидшуда, муҳлати бозгашти сармоягузорӣ ва арзиши софи ҷорӣ.

Объекти таҳқиқот: дастгоҳҳои фотоэлектрикии офтобӣ, ки дар бомҳои биноҳо ҷойгир шудаанд, ва фаъолияти онҳо дар шароити Тоҷикистон.

Мавзӯи (предмет) таҳқиқот: хусусиятҳои энергетикӣ, фазой ва иқтисодии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ, инчунин маҷмуӣ омилҳои, ки самаранокии онҳоро ҳангоми истифодаи усулҳои иттилоотию чуғрофӣ дар шароити Тоҷикистон муайян менамоянд.

Навгонии илмӣ таҳқиқот:

1. Алгоритми худкори муайян намудани масоҳати муфид ва самтгирии бомҳо таҳия карда шуд, бо истифода аз усули

росткунҷаи ҳадди ақал гардонидашуда (усули росткунҷаи гардонидашудаи ҳадди ақал).

2. Методикаи ҳамгироёнаи арзёбии иттилоотию ҷуғрофии иқтисодии техникаи бомҳо барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои энергетикаи офтобӣ пешниҳод гардид, ки ба шароити набудани моделҳои муфассали рақамии сатҳи биноҳо ва ба релефи мураккаби кӯҳистонии Тоҷикистон мутобиқ карда шудааст.
3. Методикаи мукаммали таҳлили техникаю иқтисодии самаранокии дастгоҳҳои офтобии бомӣ таҳия карда шуд, ки ҳисобкунии тавлиди солонаи неруи барқ, арзиши аслии неруи барқ, муҳлати бозгашти сармоягузорӣ ва ташкили таснифоти ҳамгироёнаи мувофиқати бомҳо-ро дар асоси маҷмӯи нишондиҳандаҳои фазоӣ ва иқтисодӣ дар бар мегирад.

Аҳамияти назариявӣ ва илмӣ-амалӣ. Аҳамияти назариявӣ дар рушди тасаввуроти илмӣ оид ба усулҳои таҳлили иттилоотию ҷуғрофии потенциали офтобӣ, инчунин дар моделсозии хусусиятҳои фазоии биноҳо барои арзёбии мувофиқати энергетикаи объектҳо ифода меёбад. Кор заминаи илмиро барои татбиқи усулҳои иттилоотию ҷуғрофӣ дар масъалаҳои энергетикаи тақсимшуда дар шароити набудани додаҳои муфассали фазоӣ ташаккул медиҳад.

Аҳамияти илмӣ-амалӣ дар имконияти истифодаи методикаҳои таҳияшуда инъикос меёбад:

- ҳангоми лоиҳакашии дастгоҳҳои офтобии бомӣ барои объектҳои таъиноти гуногун;
- ҳангоми гузаронидани ташхисҳои энергетикаи биноҳо;
- дар ташаккули барномаҳои муниципалӣ ва давлатии рушди тавлиди тақсимшудаи неруи барқ;
- ҳангоми таъсиси «кадастрҳои рақамии офтобӣ»;
- дар таҳқиқотҳои таҳлилий доир ба лоиҳаҳои байналмилалӣ вобаста ба рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия;

– ҳангоми омода намудани қарорҳои сармоягузори ва интихоби минтақаҳои аз ҳама умедбахш.

Методикаи таҳияшуда дорои имконияти васеъгардонӣ мебошад ва метавонад дар сатҳи биноҳои алоҳида, маҳаллаҳо, шаҳрҳо ва дар маҷмӯъ дар сатҳи кишвар татбиқ гардад.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Методикаи арзёбии иттилоотию чуғрофии иқтидори техникаи бомҳои биноҳо барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои энергетикӣ офтобӣ, ки ба коркарди худкори додаҳои фазой ва моделсозии афканиши офтобӣ асос ёфтааст.
2. Модели ҳисобкунии иқтидори насбшаванда ва тавлиди солонаи энергия тавассути дастгоҳҳои офтобии бомӣ, ки геометрияи бом, афтиши рӯшноӣ ва хусусиятҳои иқлимиро ба назар мегирад.
3. Методикаи арзёбии маҷмуии техникаю иқтисодии самаранокии дастгоҳҳои офтобии бомӣ, ки ҳисобкунии нишондиҳандаҳои иқтисодӣ ва ташкили таснифоти ҳамгиरोёнаи мувофиқати бомҳоро дар бар мегирад.

Дарачаи эътимоднокии натиҷаҳо диссертатсия.

Эътимоднокии натиҷаҳо бо истифодаи маҷмуаҳои додаҳои иқлимӣ ва фазой дар таҳқиқот муайян мегардад, ки аз санҷиши байналмилалӣ гузашта, барои ҳудудҳои дорои рельефи мураккаб сатҳи дақиқии муайяншуда доранд. Алгоритмҳои истифодашудаи моделсозии иттилоотию чуғрофӣ ба усулҳои умумикабулшудаи таҳлили фазой ва ҳисобкунии адабии афтиши энергияи офтобӣ таъя мекунанд, ки такрорпазирии ҳисобҳоро таъмин менамояд.

Дурустии қиматҳои ҳисобшуда тавассути мувофиқати онҳо бо нишондиҳандаҳои воқеии фаъолияти дастгоҳҳои амалкунандаи офтобӣ, инчунин бо муқоиса бо манбаъҳои мустақили иттилооти харитасозӣ тасдиқ шудааст. Таҳлили ҳассосияти моделҳо нисбат ба тағйирёбии параметрҳои воридшаванда анҷом дода шуд, ки устувории вобастагиҳои асосиро ошкор намуд.

Санчиши натиҷаҳои кори диссертатсионӣ дар чорабиниҳои илмӣ ва муҳокимаи коршиносии равишҳои методии истифодашуда асоснокӣ ҳулосаҳои бадастомадаро ва мувофиқати онҳоро ба тасаввуроти муосир дар соҳаи низомҳои энергетикӣ, ки бар манбаъҳои барқароршавандаи энергия таъядоранд, тасдиқ менамояд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Мавзуи диссертатсия ба Шиносномаи номенклатураи ихтисосҳои Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон барои ихтисоси 2.3 – Энергетика ва электротехника (2.3.3 - Дастгоҳҳои энергетикӣ дар асоси намудҳои барқароршавандаи энергия) , бахусус нуктаҳои зерин мувофиқат мекунад:

2. Таҳлили назариявӣ, таҳқиқоти таҷрибавӣ, моделсозии физикӣ ва математикӣ нерӯгоҳҳои барқӣ, нерӯгоҳҳои барқӣ ва комплексҳои энергетикӣ дар асоси манбаъҳои энергияи барқароршаванда бо мақсади беҳсозии параметрҳо ва усулҳои истифодаи онҳо.

4. Таҳияи равишҳои илмӣ, усулҳо, алгоритмҳо ва барномаҳо, дастгирии иттилоотӣ барои мониторинг ва таҳлил, арзёбии эътимоднокии таҷҳизот, нерӯгоҳҳои барқӣ, нерӯгоҳҳои барқӣ ва маҷмааҳои энергетикӣ дар маҷмӯъ.

Саҳми шахсии доктараи дараҷаи илмӣ. Саҳми шахсии муаллиф дар ташаккул ва асоснок намудани равиши методӣ барои арзёбии иқтисодии техникаю иқтисодии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ ифода меёбад, ки бар таҳлили иттилоотию ҳуҷрофии додаҳои фазоии кушода асос ёфтааст. Дар доираи ин равиш муайян намудани афтиши энергияи офтобӣ, дараҷаи сояфканӣ, самтгирии бомҳо ва ҳисобкунии тавлиди интизории нури барқ амалӣ карда шудааст. Алгоритмҳои бадастомада, тартиботи ҳисобкунӣ, натиҷаҳои моделсозӣ ва тамоми ҳулосаҳои пешниҳодшуда дар мақолаҳои илмӣ чопшудаи муаллиф пурра аз ҷониби худӣ ӯ иҷро гардидаанд.

Тасвиб ва амалисозӣ. Натиҷаҳои асосии диссертатсия дар Конфронси II-уми байналмилалӣ илмӣ-техникӣ «Уфуқҳои нави рушди камқарбогидратҳо дар Ўзбекистон» (25-26 сентябри соли 2025); дар Конфронси байналмилалӣ «Ҳолат ва дурнамои рушди энергияи барқароршаванда дар Тоҷикистон» (23-25 июни соли 2025); дар Конфронси байналмилалӣ илмӣ-амалӣ «Мушкилот ва дурнамои рушди илмҳои физикӣ» (Хучанд, 2025) пешниҳод ва муҳокима карда шуданд.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Дар асоси таҳқиқоти анҷомдодашуда дар мавзуи диссертатсия 8 мақола нашр шудаанд, аз ҷумла 3 мақола дар маҷаллаҳои баррасишаванда, ки ба рӯйхати Комиссияи олии аттестатсионӣ назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил карда шудаанд, 1 мақола дар маҷаллаҳои баррасишаванда, ки дар пойгоҳи додаҳои Scopus индексатсия шудаанд ва 4 мақола дар маҷмӯаҳои мақолаҳо ва маводҳои конфронсҳои байналмилалӣ.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, се боб, хулоса ва рӯйхати адабиёт иборат аст. Ҳаҷми диссертатсия 142 саҳифа буда, аз 18 расм ва 15 ҷадвал иборат аст. Рӯйхати адабиёт 137 манбаъро дар бар мегирад.

Қисмҳои асосии таҳқиқот

Дар муқаддима асоснокии аҳамияти мавзуи таҳқиқот, тавсифи ҳолати низоми энергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон ва зарурати рушди тавлиди тақсимшудаи неруи офтобӣ оварда шудаанд.

Дар боби якуми диссертатсия таҳлили низомманди ҳолати кунунӣ низоми энергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон анҷом дода шудааст, ки заминаҳои рушди тавлиди тақсимшудаи неруи офтобиро муайян менамояд. Нишон дода мешавад, ки бартарияти гидроэнергетика дар сохтори тавлиди неруи барқ боиси мавсимияти равшани таъминоти энергетикӣ мегардад ва дар давраи тирамоҳу зимистон ба норасоии қувва меорад, ки он аз ҳисоби талафоти назаррас

дар шабакаҳои барқӣ боз ҳам шиддат мегирад. Ҳамзамон, шароити табиӣ-иқлимӣ кишвар – сатҳи баланди афтиши энергияи офтобӣ, давомнокии зиёди тобиши офтоб ва доираи васеи минтақаҳои ҷуғрофӣ мусоид – захираи объективиро барои рушди низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ ҳамчун унсур баланд бардоштани эътимоднокии таъминоти нури барқ фароҳам меоранд. Нақши низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ дар таҳкими устувории низоми энергетикӣ баррасӣ гардидааст: тавлиди маҳаллӣ талафоти шабакавиро коҳиш медиҳад, шабакаҳои тақсимотиро қисман сабук месозад ва худкифоии энергетикӣ истеъмолкунандагонро баланд мебардорад. Дар боб инчунин баррасии равишҳои байналмилалӣ оид ба арзёбии потенциали офтобии бомҳои биноҳо пешниҳод шудааст, аз ҷумла усулҳои, ки ба ҷенкунии лазерии масофавӣ, кадастрҳои сеченакаи шаҳрсозӣ ва моделҳои рақамӣ дақиқӣ сатҳ асос меёбанд. Нишон дода шудааст, ки татбиқи мустақими ҷунин равишҳо дар Тоҷикистон бо сабаби набудани додаҳои ҷенкунии лазерии масофавӣ ва кадастрҳои муфассали сеченака маҳдуд мебошад. Дар бахши ҷудоғона усулҳои оварда шудаанд, ки барои кишварҳои дорони додаҳои маҳдуди фазоӣ қобили татбиқ мебошанд: истифодаи додаҳои кушодаи ҷуғрофӣ (OSM, Microsoft Building Footprints), моделҳои глобалии рақамӣ релеф, инчунин додаҳои моҳвораӣ ва додаҳои бозсозишуда оид ба радиатсияи офтобӣ. Таъкид мегардад, ки ҷунин манбаъҳо дар сурати коркарди дуруст ва санҷиши боэътимод имкон медиҳанд, ки арзёбиҳои ибтидоии иқтисодии техникӣ бомҳо бо сатҳи қобили қабули дақиқӣ анҷом дода шаванд. Дар натиҷаи таҳлили боби аввал масъалаи илмӣ таҳқиқот баён мегардад, ки дар зарурати таҳияи методикаи махсуси арзёбии самаранокии техникӣ ва техникӣ иқтисодии низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ ифода меёбад. Ин методика бояд ба шароити Тоҷикистон мутобиқ карда шуда, бар

истифодаи додаҳои дастрас ва кушодаи фазой ва абзорҳои таҳлили иттилоотию чуғрофӣ асос ёбад.

Дар **боби дуюми** диссертатсия методикаи арзёбии маҷмуии техникаю иқтисодии самаранокии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ баён гардидааст, ки ба шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон мутобиқ карда шуда, ба истифодаи усулҳои иттилоотию чуғрофӣ дар шароити маҳдуд будани додаҳои муфассали фазой равона шудааст. Ҳамчун манбаи асосии иттилоот контурҳои вектории биноҳо аз пойгоҳи додаҳои Microsoft Building Footprints истифода шудаанд, ки қаламрави кишварро дар ҳудуди координатаҳои $67.3^\circ \leq \lambda \leq 75.3^\circ$ ва $36.5^\circ \leq \varphi \leq 41.1^\circ$ фаро мегиранд. Барои ҳамаи биноҳо қиматҳои масоҳати умумии сатҳи бом ҳисоб карда шудаанд. Бо дарназардошти маҳдудиятҳои муҳандисӣ, аз ҷумла мавҷудияти болохонаҳо, иншооти вентилятсионӣ ва дигар унсурҳои техникӣ, қабул карда шудааст, ки танҳо қисме аз масоҳати бом метавонад барои ҷойгиркунии панелҳои офтобӣ самаранок истифода шавад. Саҳми иҷозатдодашудаи масоҳати муфид чунин муайян мегардад:

$$A_{\text{муфид}} = A_{\text{бom}} \times r_{\text{бom}} \times k_{\text{соя}}$$

инҷо, $A_{\text{муфид}}$ – масоҳати муфиди бом, м²; $A_{\text{бom}}$ – масоҳати умумии бом, м²; $r_{\text{бom}}$ – коэффитсиенти мувофиқати бом (қабул карда шудааст баробар ба 0,75); $k_{\text{соя}}$ – ислоҳи вобаста ба фосолаи байниқаторӣ (*).

Параметри охири (*) дар асоси геометрияи ҷойгиркунии панелҳо муайян карда мешавад:

$$A_{\text{панели}} = L_{\text{панел}} \times \cos(\alpha) \times W_{\text{панел}}$$

ки дар он: $L_{\text{панели}}$ – дарозии панел (1.775 м), $W_{\text{панели}}$ – паҳноии панел (1.098 м), α – кунҷи нишебии панел (30°).

Кунҷи офтобии зимистона:

$$\theta_{\text{офтоб}} = 90^\circ - \varphi - 23.5^\circ$$

где φ – паҳноии чуғрофии минтақаи насб .

Масофаи байни қаторҳо:

$$S_{\text{катор}} = \frac{H}{\tan \theta_{\text{офтоб}}}$$

Коэффитсиенти ислоҳ барои сояфканӣ чунин ҳисоб карда мешавад:

$$k_{\text{соя}} = \frac{A_{\text{панел}}}{A_{\text{панел}} + S_{\text{катор}} \times W_{\text{панел}}} (*)$$

Шумораи панелҳои насбшаванда:

$$N_{\text{панел}} = \left[\frac{A_{\text{муфид}}}{A_{\text{панел}}} \right]$$

Самтгирии сатҳи бом таъсири ҳалқунанда ба самаранокии энергетикӣ дастгоҳ мерасонад. Дар таҳқиқот барои муайян намудани самти ҳукмрони бом, бо таъя ба геометрияи фазоии он, усули таҳлили чузъҳои асосӣ истифода шудааст.

Барои ҳар як объект қимати азимут $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ҳисоб карда шуд, ки дар он 0° ба самти шимол ва 180° ба самти ҷануб (самти оптималӣ) мувофиқат мекунад. Ислоҳи вобаста ба самтгирӣ бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$f_{\text{самтгирӣ}} = \max(\cos(\theta - 180^\circ), f_{\text{мин}})$$

инҷо, θ азимути бом бо дараҷа аст, $f_{\text{мин}}$ – коэффитсиенти ҳадди ақали иҷозатдодашудаи самтгирӣ (қабул карда шудааст баробар ба 0,5).

Барои арзёбии потенциали тавлиди неруи офтобӣ додаҳо оид ба сатҳи солонаи радиатсияи офтобӣ (PVOUT) истифода шуданд, ки аз манбаи моҳворагии SolarGIS ба даст оварда шудаанд. Барои ҳар як бино маркази геометрии он бо пиксели мувофиқи растр мутобиқ карда шуд, ки ин имкон дод қимати R_{PVOUT} – нишондиҳандаи миёнаи солонаи тавлиди неруи офтобӣ ба ҳар 1 кВт иқтидори насбшудаи панелҳо – муайян карда шавад. Қиматҳои PVOUT иқтидори маҷмуии иқлимӣ макони ҷуғрофӣ мушаххасро инъикос мекунанд ва таъсири омилҳои чун абрнокӣ, азрозолҳои атмосфера, инъикоснокии сатҳ (алbedo) ва дигар параметрҳои муҳитиро дар бар мегиранд. Ҳисобкунии

ниҳоии параметрҳои дастгоҳи офтобӣ барои ҳар як бино тибқи формулаҳои зерин анҷом дода шуд:

Иқтидори насбшуда

$$P_{\text{набшуда}} = N_{\text{панел}} \times P_{\text{панел}}$$

Истеҳсоли солонаи нерӯи барқ

$$E_{\text{солона}} = P_{\text{набшуда}} \times R_{PVOUT} \times f_{\text{самтгирӣ}} \times \eta_{\text{соя}}$$

Инҷо, $P_{\text{панел}}$ – иқтидори номиналии як панел (0.4 кВт); $\eta_{\text{затенения}}$ – коэффитсиенти сояфканӣ (0,95); $f_{\text{самтгирӣ}}$ – ислоҳ барои самтгирии бом; R_{PVOUT} – сатҳи солонаи тавлиди неруи офтобӣ ба 1 кВт иқтидори насбшуда.

Бахши иқтисодии модел ҳисобкунии хароҷоти сармоявӣ ва хароҷоти истифодабариро барои насби низоми офтобии бомӣ дар бар мегирад. Сармоягузори ибтидоӣ ҳамчун ҳосили зарби иқтидори умумии насбшуда P_{total} ва қимати воҳидии насб бо дарназардошти коэффитсиенти минтақавии ислоҳқунанда муайян карда мешавад. Ин вобастагӣ ба шакли зерин ифода меёбад:

$$C_{\text{наб}} = P \cdot C_{\text{арзиш}} \cdot \gamma$$

ки дар он $c_{\text{арзиш}} = 820$ ИМА/кВт арзиши асосии насби низоми офтобӣ, $\gamma = 1.20$ зарби ислоҳқунанда, ки хароҷоти иловагӣ (логистика, корҳои насб, расмиёти маъмурий)-ро ба ҳисоб мегирад.

Хароҷоти солонаи истифодабарӣ хизматрасонии техникӣ ва назорати кори таҷҳизотро дар бар мегиранд. Онҳо мутаносиб ба иқтидори насбшуда ҳисоб карда мешаванд:

$$C_{\text{хароҷоти солона}} = P \cdot C_{\text{хизматрасонӣ}}$$

инҷо, $C_{\text{хизматрасонӣ}} = 18$ доллари ИМА/кВт/сол хароҷоти миёнаи солона барои хизматрасонӣ.

Даромад аз истифода ҳамчун ҳосили зарби ҳаҷми тавлиди солонаи неруи барқ $E_{\text{солона}}$ ва тарифи муқарраршудаи неруи барқ ҳисоб карда мешавад:

$$R_{\text{солона}} = E_{\text{солона}} \cdot t$$

Инҷо, 0,032 ИМА/кВт · соат тарифи муқарраршуда барои хоҷагиҳои хонагӣ дар Тоҷикистон.

Фоидаи софи солона ҳамчун фарқи байни даромади солона ва хароҷоти истифодабарӣ муайян мегардад:

$$\Pi = R_{\text{солона}} - C_{\text{хароҷоти солона}}$$

Барои арзёбии ҷолибияти сармоягузори лоиҳа нишондиҳандаи РР истифода мешавад, ки ҳамчун нисбати арзиши умумии насб ба фоидаи софи солона муайян карда мешавад. Ҳангоми мавҷуд будани фоидаи мусбат муҳлати бозгашти сармоягузорӣ чунин ҳисоб карда мешавад:

$$PP = \frac{C_{\text{насб}}}{\Pi}$$

ва дар сурати нофоида будани лоиҳа (дар $\Pi \leq 0$) РР беохир ҳисобида мешавад.

Нишондиҳандаи дигари калидӣ арзиши софи ҷорӣ (АСЧ) мебошад, ки арзиши ҷорӣ даромади ояндаро бо назардошти тахфиф инъикос мекунад:

$$ACЧ = \Pi \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} - C_{\text{насб}}$$

ки дар он $r = 0.11$ меъёри тахфиф ва $n = 25$ сол муҳлати хизмати нерӯгоҳ аст. Ҳангоми доштани қимати мусбати АСЧ лоиҳа аз ҷиҳати иқтисодӣ мақбул ҳисобида мешавад.

Арзиши миёнаи овардашудаи неруи барқ (АМОНБ) барои арзёбии арзиши аслии истехсоли як киловатт-соат неруи барқ дар тӯли тамоми давраи хизмати низом ҳисоб карда мешавад. Ҳангоми ҳисобкунӣ хароҷоти сармоявӣ ва арзиши миёнаи овардашудаи энергия ба ҳаҷми тавлиди неруи барқ нисбат дода мешаванд:

$$AMONB = \frac{C_{\text{насб}} \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-T}} + C_{\text{хароҷоти солона}}}{E_{\text{солона}}}$$

Ин нишондиҳанда ҳамчун нишондиҳандаи асосӣ барои муқоиса бо тарифи бозорӣ истифода мешавад. Илова бар ин, дар доираи ин модел варианти алтернативии АМОНБ барои сценарияи коҳиши хароҷоти сармоявӣ ба 20 фоиз ҳисоб карда мешавад, то ҳассосияти модели сармоягузорӣ арзёбӣ гардад.

Бо мақсади ноил шудан ба даромадноқӣ, механизми тарифи ҳавасмандгардонанда (ба истилоҳ «тарифи сабз») пешниҳод мегардад, ки ҳамчун афзоиши ғоизӣ нисбат ба арзиши АМОНБ муқаррар карда мешавад. Дар ин таҳқиқот маржаи 15 ғоиз истифода шудааст, ки сатҳи ғоизоварии меъёри сармоягузorro инъикос менамояд:

$$T_{\text{сабз}} = \text{АМОНБ} \cdot (1 + \delta)$$

инҷо, $\delta = 0.15$ -зариби маржа мебошад. Фарқият байни тарифи ҳавасмандгардонанда ва тарифи амалкунандаи нуруи барқ тафовути тарифиро ташаккул медиҳад:

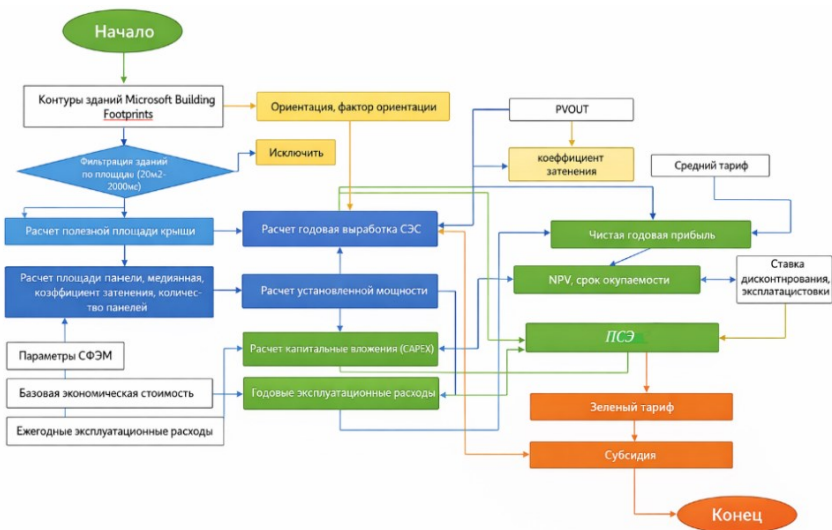
$$\Delta T = T_{\text{сабз}} - t.$$

Ҳангоми қимати мусбати тафовути тарифӣ зарурати субсидиякунии давлатӣ ба миён меояд, ки ҳаҷми он тибқи ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$S_{\text{субсидия}} = \max(0, \Delta T) \cdot E_{\text{солона}}$$

Арзишҳои субсидияҳо барои ҳар як объект алоҳида ҳисоб карда шуда, сипас дар сатҳи ноҳия ҷамъбааст мегарданд. Ин додаҳо барои таҳияи тавсияҳо оид ба тақсими дастгирии давлатӣ истифода мешаванд.

Методикаи таҳияшудаи арзёбии маҷмуии техникаию иқтисодӣ бо истифода аз технологияҳои иттилоотию ҷуғрофӣ татбиқ гардидааст, ки имконияти худкорсозии ҳисобҳо барои шумораи зиёди объектҳо ва намоиш додани натиҷаҳо дар харитаҳо-ро фароҳам меорад (Расм 1). Дар ин бахш меъмурии алгоритм, сохтори модули таҳияшудаи ГИС, инчунин хусусиятҳои татбиқи он барои ҳисобкунии нишондиҳандаҳо барои маҷмуи биноҳо ва ташаккули «кадастри рақамии офтобии» бомҳо тавсиф карда мешаванд. Алгоритми татбиқи методикаро метавон ба якҷанд марҳилаи пайдарпай (блокҳо) ҷудо намуд, ки ҳар яке ба таври барномавӣ иҷро шуда, дар як раванди ягона ҳамгиро карда шудаанд.



Расми 1. – Алгоритми татбиқи геоинформатсионии методологияи таҳияшуда барои арзёбии потенциали офтобии бомаҳо

Дар татбиқи иттилоотию чуғрофӣи методикаи хамаи марҳилаҳои дар боло зикршуда дар муҳити Python бо истифода аз китобхонаҳои коркарди додаҳои чуғрофӣ, хондани додаҳои растерии PVOUT, амалиётҳои ҳисоббарорӣ, инчунин скриптҳои муаллифӣ барои татбиқи формулаҳо иҷро карда шудаанд.

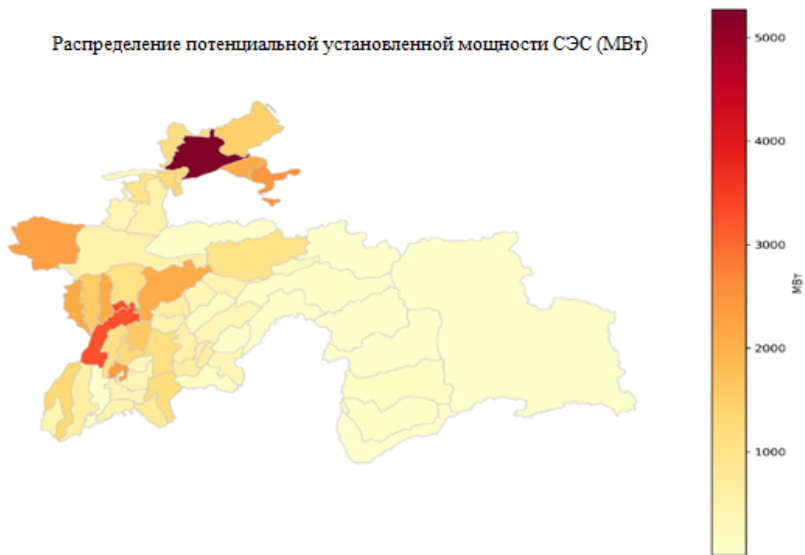
Дар **боби сеюми** диссертатсия натиҷаҳои татбиқи амалии методикаи таҳияшудаи арзёбии самаранокии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон пешниҳод шудаанд. Дар асоси таҳлили иттилоотию чуғрофӣ арзёбии иқтидори техникийи низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ аз рӯи ноҳияҳои маъмурии кишвар анҷом дода шуд. Муайян гардид, ки тағлиди миёнаи солони ҳисобшудаи неруи барқ ба 1400 -1700 кВт·соат ба ҳар 1 кВт иқтидори насбшуда баробар мебошад, дар ҳоле ки коэффитсиенти истифодаи иқтидори насбшуда дар доираи 0,16–0,20 қарор дорад. Нишондиҳандаҳои чамбастии техникийи иқтисодӣ аз рӯи минтақаҳо дар чадвали 1 оварда шудаанд, дар ҳоле ки тақсими фазои иқтидори техникийи

низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ дар расми 2 инъикос ёфтааст.

Ҷадвали 1. – Нишондиҳандаҳои асосии техникӣ ва иқтисодии системаҳои фотоэлектрикии бомпӯшӣ аз рӯи ноҳияҳои маъмурии Ҷумҳурии Тоҷикистон

Минтақа	Ноҳия ё шаҳр	Иқтидори умумӣ, МВт	Истеҳсоли солона, ГВт/соат	АМОНБ дар сенарияи асосӣ	Шумораи биноҳо	АМОНБ бо коҳиши 20% хароҷоти сармоя
Ноҳияҳои тобеи марказ	Файзобод	624.5	567.3	0.036	41494	0.033
	Ҳисор	2078.8	2002.1	0.035	137286	0.032
	Лахш	3.5	3005.7	0.038	302	0.035
	Нуробод	397.6	349.9	0.038	34707	0.035
	Рашт	1013.1	845.4	0.040	82241	0.036
	Роғун	365.5	312.7	0.038	28175	0.035
	Рӯдакӣ	3537.6	3229.1	0.036	243596	0.033
	Шаҳринав	1587.8	1504.8	0.036	108449	0.033
	Сангвор	54.8	42.7	0.042	5328	0.038
	Тоҷикобод	205.4	163.7	0.041	18542	0.038
	Турсунзода	2088.4	1869.3	0.036	137861	0.033
	Ваҳдат	2066.9	1885.5	0.036	134020	0.033
	Варзоб	1087.7	999.4	0.036	81913	0.033
	Душанбе	3271.8	3028.8	0.036	191261	0.033
ВМКБ	Ишқошим	13.8	12.2	0.037	1129	0.034
	Мурғоб	11.3	11.8	0.032	872	0.029
	Роштқалъа	67.1	59.3	0.037	3717	0.034
	Руслан	17.4	15.0	0.039	1738	0.036
	Шугнон	142.1	125.0	0.038	7909	0.035
	Ванҷ	16.4	12.9	0.041	1578	0.037
Вилояти Ҳағлон	Балҷувон	149.3	133.7	0.036	13072	0.033
	Кушониён	2380.5	2058.4	0.038	156600	0.035
	Данғара	1168.1	1053.9	0.037	93337	0.033
	Фархор	1217.4	1083.0	0.037	89928	0.034
	Дусти	14.8	14.4	0.035	1224	0.032
	Чомӣ	1283.6	1156.7	0.037	100975	0.034
	Ховалинг	341.2	311.1	0.036	25190	0.033
	Хуросон	1132.3	997.8	0.037	91261	0.034

Минтақа	Ноҳия ё шаҳр	Иқтидори умумӣ, МВт	Истеҳсоли солона, ГВт/соат	АМОНБ дар сценария асосӣ	Шумораи биноҳо	АМОНБ бо коҳиши 20% хароҷоти сармоя
Вилояти Ҳағлон	Ҳамадонӣ	95.8	79.6	0.039	6885	0.035
	Муминобод	12.9	11.3	0.037	1160	0.034
	Норак	457.5	428.3	0.036	33704	0.033
	Носири Хусрав	385.9	326.8	0.038	31890	0.035
	Панҷ	781.2	659.4	0.039	58919	0.035
	Кабодиён	604.9	523.2	0.037	42042	0.034
	Чайхун	437.1	404.1	0.036	25076	0.033
	Леваконт	350.3	290.8	0.038	26875	0.035
	Шаҳритус	1328.1	1198.6	0.036	100016	0.033
	Темурмалик	538.2	497.3	0.035	42437	0.033
	Вахш	401.5	363.0	0.036	33838	0.033
	Восеъ	602.7	536.9	0.037	39437	0.034
	Ёвон	1593.9	1500.6	0.035	124430	0.032
Вилояти Суғд	Ашт	1466.1	1219.8	0.039	121575	0.036
	Айнӣ	510.3	475.4	0.037	40782	0.033
	Б.Ғафуров	5271.0	4317.8	0.040	316271	0.037
	Деваштич	527.1	455.8	0.038	32074	0.035
	Исфара	2465.7	1969.2	0.041	166773	0.037
	Истаравшан	1023.6	916.8	0.037	57634	0.034
	Чаббор Расулов	1275.3	1077.2	0.039	69156	0.036
	Конибодом	2095.0	1680.5	0.041	131052	0.037
	Кӯҳи Мағча	58.5	49.6	0.040	5604	0.037
	Мағча	1144.2	1023.0	0.038	79523	0.034
	Панҷакент	2287.4	2295.6	0.035	130123	0.032
	Шаҳристон	378.1	352.6	0.036	27050	0.033
	Спитамен	1336.6	1168.9	0.039	73999	0.035
	Зафаробод	206.3	179.6	0.038	12074	0.035
Чамъ/Миёна	53974.0	47850.8	0.039	3664104	0.036	



Расми 2. - Тақсимоти фазоии иқтидори эҳтимолии насбшуда (МВт) дар ноҳияҳо

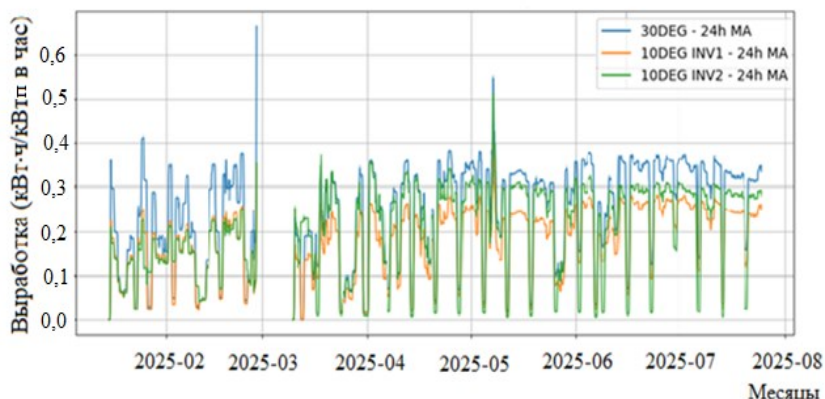
Арзёбии иқтидори истифодаи энергияи офтобӣ барои намудҳои гуногуни биноҳо дар шаҳри Душанбе анҷом дода шуд, аз ҷумла барои биноҳои истиқоматӣ, саноатӣ, иҷтимоӣ, қорӣ ва объектҳои таъиноти дигар. Дар доираи таҳқиқот биноҳои навъи баракӣ ва хонаҳои инфиродии камқабата баррасӣ нашудаанд, зеро аксари онҳо дар дурнамои миёнамуҳлат ба барҳамдиҳӣ пешниҳод мешаванд (ҷадвали 2).

Таҳлили муқоисавии кишварҳои Осиёи Марказӣ нишон дод, ки нишондиҳандаҳои техникую иқтисодии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ дар Тоҷикистон бо нишондиҳандаҳои монанд дар кишварҳои ҳамсоя қобили муқоиса буда, дар баъзе ҳолатҳо бо сабаби сатҳи баландтари радиатсияи офтобӣ аз онҳо бартарӣ доранд.

Чадвали 2. -Иқтидори эҳтимолии насбшуда ва истеҳсоли солона барои шаҳри Душанбе

Навъи бино	Иқтидори эҳтимолии насбшуда (МВт)	Истеҳсоли эҳтимолии солона (ГВт/соат)
Биноҳои офисӣ	2.6	3.7
Биноҳои нави истиқоматӣ	66.5	95.8
Беморхонаҳо	4.2	6.1
Кӯдакистонҳо	6.1	8.8
Мактабҳо	19.5	28.1
Биноҳои истиқоматии кӯҳна бидуни лифт	60.4	86.9
Биноҳои истиқоматии кӯҳна бо лифт	8.3	11.9
Меҳмонхонаҳо	1.6	2.3
Мақомоти давлатӣ	11.1	15.9
Донишгоҳҳо	12.6	18.2
Иншоотҳои саноатӣ	80	115.1
Марказҳои савдо	3.9	5.6
Ресторанҳо	1.1	1.5
истгоҳи сӯзишворӣ	0.5	0.7
Истгоҳҳои автобус, истгоҳҳои роҳи оҳан, таксӣ	7.8	11.2
Маҷмааҳои варзишӣ	0.3	0.4
Номаълум	2.9	4.2
Бозорҳо	21.3	30.6
Ҷамъ	310.7	447

Санҷиши таҷрибавии таъсири кунҷи нишебии модулиҳои фотоэлектрикӣ нишон дод, ки дуршавӣ аз қимати оптималӣ ба $10-15^\circ$ ба қоҳиши тавлиди солонаи неруи барқ на бештар аз 5–8 фоиз меорад. Ин натиҷа имконияти истифодаи кунҷҳои нишебии конструктивии бомҳо-ро, ки бо меъморӣ муайян шудаанд, тасдиқ менамояд. Вобастагии зикршуда дар расми 3 нишон дода шудааст.



Расми 3. – Динамикаи муқоисавии ҳосили махсуси се насби фотоэлектрикӣ (кунҷҳои майл 30°, 10° INV1 ва 10° INV2) дар асоси миёнаи ҳаракаткунандаи 24-соата

Натиҷаҳои ин таҳқиқот бо интизориҳои назариявӣ, ки бар геометрияи афтиши нурҳои офтоб асос ёфтаанд, комилан мувофиқат мекунад. Натиҷаҳои бадастомада мувофиқати техникаю иқтисодии ҷорӣ намудани низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомиро дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон тасдиқ намуда, қобили татбиқ будани методикаи таҳияшударо барои арзёбии иқтидори тавлиди тақсимшудаи нури офтобӣ дар сатҳи биноҳо, шаҳрҳо ва минтақаҳо нишон медиҳанд.

ХУЛОСАҶО

1. Арзёбии иттилоотию ҷуғрофии анҷомдодашуда тасдиқ намуд, ки методикаи ба додаҳои кушода (OSM ва Microsoft Building Footprints) асосёфта дақиқии кофии муайянсозии масоҳати мувофиқи бомҳо ва иқтидори тавлидро дар шароити набудани ченкунии лазерии масофаӣ ва кадастрҳои сеченака таъмин менамояд. Ин ҳолат татбиқпазирии онро барои банақшагирии энергетикӣ минтақаӣ ва маҳаллӣ нишон медиҳад [1–М, 2 – М, 3 – М, 4 – М, 5 – М].

2. Таҳлили фазоии иттилоотию чуғрофӣ имкон дод, ки 3 664 104 бино бо масоҳати мувофиқи бом зиёда аз 20 м² интихоб карда шаванд. Иқтидори техникӣ ҷамъии низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон 53,97 ГВт иқтидори насбшуда ва 47,85 млрд кВт·соат тавлиди солонаи ҳисобшударо ташкил медиҳад [3– М, 8 – М].
3. Таҳқиқоти муфассал барои шаҳри Душанбе нишон дод, ки барои 3 880 бино масоҳати умумии бомҳо 4,27 км²-ро ташкил медиҳад, ки аз он 3,10 км² барои ҷойгиркунии низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ мувофиқ доништа шудаанд (яъне тақрибан 73 фоиз аз масоҳати ибтидоӣ). Иқтидори техникӣ мутаносиб 310,7 МВт, иқтидори насбшуда ва 447 ГВт·соат тавлиди солоноро ҳангоми тарҳбандии оқилонаи панелҳо ташкил медиҳад. [4 – М, 7 – М].
4. Ҳисобкунии АМОНБ аз рӯи ноҳияҳои маъмуриӣ нишон дод, ки дар сенарияи асосӣ қиматҳои АМОНБ дар доираи 0,032–0,042 USD/кВт·соат қарор доранд; барои аксари ноҳияҳо ин нишондиҳанда 0,035–0,040 USD/кВт·соат мебошад, ки бо тарифи амалкунандаи аҳоли (0,032 USD/кВт·соат) қобили муқоиса ё аз он болотар аст. Паҳноии фарқияти АМОНБ байни ноҳияҳо Δ АМОНБ \approx 0,010 USD/кВт·соат-ро ташкил дода, ҳадди аксари тафовути тарифӣ (АМОНБ минус тарифи амалкунанда) ба 0,016 USD/кВт·соат мерасад, яъне то 31 фоиз ва бештар нисбат ба тарифи асосӣ. [1– М, 2– М].
5. Дар сенарияи коҳиши хароҷоти сармоявӣ ба 20 фоиз қиматҳои миёнаи АМОНБ аз рӯи ноҳияҳо то 0,029–0,038 USD/кВт·соат поин мераванд ва коҳиши мутлақи АМОНБ нисбат ба сенарияи асосӣ 0,003–0,004 USD/кВт·соат-ро ташкил медиҳад. Бо вучуди ин, ҳатто дар чунин шароит ягон ноҳия арзиши софи ҷорӣ

- мусбат нишон намедихад, ки нокифоя будани танҳо арзоншавии таҷҳизотро таъкид мекунад [1– М, 2 – М].
6. Сенарияи алтернативӣ бо баланд бардоштани тарифи барои нури барқи тавлидшуда аз низомҳои фотоэлектрикии офтобӣ то 0,045 USD/кВт·соат нишон медиҳад, ки 83,6 фоиз объектҳо даромаднок мегарданд. Ин натиҷа нақши калидии сиёсати тарифӣ ва механизмҳои тарифи ҳавасмандгардонанда (тарифи сабз)-ро дар кушодани иқтидори иқтисодии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ тасдиқ менамояд. Ҳатто бо дарназардошти коҳиши хароҷоти сармоявӣ, ҷорӣ намудани устувори тавлиди тақсимшудаи нури офтобӣ дар Тоҷикистон дастгирии маҷмӯӣ ва бисёрсатҳиро талаб мекунад: ҳавасмандгардонии тарифӣ, субсидияҳо барои хароҷоти сармоявӣ, имтиёзҳои андозӣ ва кафолатҳои дарозмуддати хариди нури барқ [1- М, 2 - М].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳои таҳқиқот

1. Истифода бурдани методикаи таҳияшуда ҳангоми банақшагирии лоиҳаҳои энергетикаи офтобии тақсимшуда дар сатҳҳои миллӣ ва минтақавӣ, бо дарбаргирии арзёбии иқтидори техникаю иқтисодии низомҳои фотоэлектрикии офтобии бомӣ.
2. Тавсия додан ба мақомоти идоракунии давлатӣ ва ҳокимиятҳои маҳаллӣ барои истифодаи «кадастри офтобии» биноҳоро барои асоснок намудани барномаҳои дастгирии низомҳои бомӣ ва интиҳоби объектҳои афзалиятнок барои лоиҳаҳои пилотӣ.
3. Татбиқи методика аз ҷониби ташкилотҳои лоиҳакашӣ ва муҳандисӣ барои ҳисобкуниҳои ибтидоии техникаю иқтисодӣ (иқтидори насбшуда, тавлиди солона, АМОНБ, муҳлати бозгашти сармоягузорӣ) ҳангоми тарҳрезии низомҳои офтобӣ дар бомҳои фонди манзилӣ, объектҳои иҷтимоӣ ва биноҳои тичоратӣ.

4. Истифодаи натиҷаҳои таҳлили иқтисодӣ ҳангоми ташаккули механизмҳои ҳавасмандгардонанда (тарифҳо, субсидияҳо, ҷубронпулиҳо), ки даромаднокии ҷорӣ намудани дастгоҳҳои фотоэлектрикии офтобии бомиро таъмин менамоянд.
5. Татбиқи методика дар амалияи меъмурию сохтмонӣ, аз ҷумла ҳангоми тарҳрезии биноҳои нави самараноки энергетикӣ бо пешбинӣ намудани имконияти ҳамгириии модуҳои офтобӣ дар сатҳи бом.

Рӯйхати адабиёт

1. Alhamwi A., Medjroubi W., Vogt T., Agert C. GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas // *Applied Energy*. 2017. Vol. 191. P. 1–9.
2. Machete R., Falcao A. P., Gomes M. G., Rodrigues A. M. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 177. P. 290–302. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.064.
3. Gassar A. A. A., Cha S. H. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales // *Applied Energy*. 2021. Vol. 291. P. 116817.
4. Schallenberg-Rodriguez J. Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. P. 219–239. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.078.
5. Byrne J., Taminiau J., Kurdgelashvili L., Kim K. N. A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 830–844. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.023.

6. Izquierdo S., Rodrigues M., Fueyo N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations // *Solar Energy*. 2008. Vol. 82. P. 929–939. DOI: 10.1016/j.solener.2008.03.007.
7. Groppi D., Santoli L.-D., Cumo F., Garcia A. A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 40. P. 546–558. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.005.
8. Akash J., Kudusov M., Akanksha J., Pramod J., Madvaliev U. A multicriteria approach to identifying and developing renewable energy zones in Tajikistan // *Applied Solar Energy*. 2023. Vol. 59, No. 2. P. 176–188.

РҶҶҲАТИ ИНТИШОРОТИ МУАЛЛИФ ДОИР БА МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

1. Мақолаҳо дар маҷаллаҳои байналмилалӣ (индексшуда дар Scopus)

[1-M] **B. N. Mahmudov**. Scalable Assessment of Rooftop Solar Potential in Central Asia using Open Data and Geometric Orientation Analysis [Текст] / U. Madvaliev, B. N. Mahmudov, A. R. Rustamzoda, M. A. Kudusov & R. Bakhromzod // *Applied Solar Energy*. - 2025. Vol. 61. P. 206–215. DOI: 10.3103/S0003701X25601280.

2. Мақолаҳо дар маҷаллаҳои тавсияшудаи ҚОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон

[2-M] Маҳмудов Б.Н. Оценка экономического потенциала руфтоп-солнечных установок в Таджикистане на основе открытых пространственных данных и мультикритериального подхода / Маҳмудов Б.Н. Мадвалиев У., Кудусов М.А., Рустамзода А.Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана 2025, том 68, №6 с. 566-577, ISSN 2791-1489

[3-М] Махмудов Б.Н. Оценка технического потенциала руфтоп-солнечных установок в Таджикистане на основе открытых пространственных данных и мультикритериального подхода /Махмудов Б.Н., Мадвалиев У., Кудусов М.А., Рустамзода А.Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана 2025, том 68, №5 с. 452-463, ISSN 2791-1489.

[4-М] Махмудов Б.Н. Оценка потенциала солнечной энергии при установке фотоэлектрических панелей на крышах зданий города Душанбе / Мадвалиев У., Кудусов М.А., Махмудов Б.Н., Бахромзод Р., // Доклады Академии Наук Республики Таджикистана 2025, том 68, №2 с. 131-141, ISSN 2791-1489

3. Рӯйхати корҳои нашршуда дар маводи конфронси байналмилалӣ

[5-М] **Махмудов Б.Н.** Влияние угла наклона фотоэлектрического модуля на выработку электроэнергии: исследование на примере крыши в северном Таджикистане [Текст] / Махмудов Б.Н., А. Давлатов // “Новые горизонты низкоуглеводного развития и в Узбекистане”, II Международная научно-техническая конференция. 25-26 сентября - 2025, – С. 32-36.

[6-М] **Махмудов Б.Н.** Сезонное влияние угла наклона фотоэлектрических модулей на выработку энергии в зимнее время: исследование на примере крыш в Таджикистане [Текст] / Махмудов Б.Н., А. Давлатов // Труды международной конференции, «Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в Таджикистане». 23-25 июня 2025 г. – С. 143-147.

[7-М] **Махмудов Б.Н.** Исследование возможностей использования солнечной энергии для установки фотоэлектрических панелей на крышах зданий Душанбе [Текст] / Махмудов Б.Н., Бахромзод Р.// Проблемы и перспективы развития физических наук: материалы

международной научно-практической конференции. г. Худжанд: Дабир, – 2025. – С. 420–424.

[8-М] **Махмудов Б.Н.** Оценка технического потенциала рифтоб-солнечных установок в Таджикистане на основе данных Microsoft building footprints и openstreetmap [Текст] / Махмудов Б.Н., Мадвалиев У., Зарифзода А., Рустамзода А.Р., Бахромзод Р., Кудусов М.А // “Новые горизонты низкоуглеродного развития в Узбекистане”, II Международная научно-техническая конференция. 25-26 сентября – 2025, – С. 109-113

АННОТАЦИЯ
МАХМУДЗОДА БЕХРУЗ НОЗИР
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
ТАДЖИКИСТАНА

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрические установки, крышные энергосистемы, геоинформационный анализ, технико-экономическая эффективность.

Цель исследования: Оценка эффективности крышных фотоэлектрических систем в условиях Таджикистана на основе геоинформационного анализа и моделирования солнечной инсоляции.

Методы исследования: Исследование выполнено на основе геоинформационного анализа с использованием данных о контурах зданий Microsoft Building Footprints, картографических данных OpenStreetMap и показателя годовой удельной выработки PVOUT из Global Solar Atlas (Solargis/ESMAP). Геометрические параметры кровли определены методом минимального ограничивающего прямоугольника с применением инструментов геоинформационных систем и авторских алгоритмов обработки данных, реализованных на языке программирования Python.

Полученные результаты и их новизна: Разработан алгоритм автоматизированного определения полезной площади и ориентации крыш на основе метода минимального повернутого прямоугольника. Предложена интегрированная геоинформационная методика оценки технического потенциала крыш для размещения солнечных установок, адаптированная к условиям горной местности и отсутствия детализированных цифровых моделей зданий. Разработана комплексная методика технико-экономической оценки эффективности крышных солнечных установок с расчётом выработки, себестоимости электроэнергии, срока окупаемости и интегральной классификацией пригодности крыш.

Рекомендации по практическому применению: Полученные результаты могут быть использованы при проектировании крышных солнечных установок, разработке муниципальных и региональных программ развития распределённой солнечной энергетики.

Область применения: энергетическая отрасль Республики Таджикистан, в том числе солнечная энергетика

АННОТАТСИЯ
МАҲМУДЗОДА БЕҲРУЗ НОЗИР
БАҲОДИҲИИ САМАРАНОКИИ НИЗОМҲОИ
ФОТОЭЛЕКТРИКИИ ДАР БОЛОИ БОМ НАСБШАВАНДА ДАР
АСОСИ НИЗОМҲОИ ГЕОИНФОРМАТСИОНӢ ДАР ШАРОИТИ
ТОҶИКИСТОН

Калимаҳои калидӣ: энергетикаи офтобӣ, насбҳои фотоэлектрикӣ, системаҳои энергетикӣ болои бино, таҳлили геоинформатсионӣ, самаранокии иқтисодию техникӣ.

Мақсади таҳқиқот: Арзёбии самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ офтобии бомӣ дар шароити Тоҷикистон дар асоси таҳлили иттилоотию чуғрофӣ ва моделсозии афтиши энергияи офтобӣ.

Усулҳои таҳқиқот: таҳқиқот бо истифода аз таҳлили геоинформатсионӣ, додаҳои контури биноҳо аз Microsoft Building Footprints, иттилооти харитасозии OpenStreetMap ва нишондиҳандаи солони ҳосилнокии энергетикӣ PVOUT аз маҷмуаи Global Solar Atlas (Solargis/ESMAP) анҷом дода шудааст. Параметрҳои геометрии бомҳо бо истифода аз усули росткунҷаи маҳдудкунандаи ҳаҷдӣ ва алгоритмҳои муаллифӣ, ки дар муҳити забони барномасозии Python амалӣ гардидаанд, муайян карда шуданд.

Натиҷаҳои бадастомада ва навгонии онҳо: Алгоритми автоматиконидашудаи муайянкунии масоҳати муфид ва самти бомҳо дар асоси усули росткунҷаи минималии гардишэфта таҳия карда шуд. Методикаи муттаҳидшудаи геоинформатсионии баҳодихии иқтидори техникӣ бомҳо барои ҷойгиркунии дастгоҳҳои энергетикаи офтобӣ пешниҳод гардид, ки ба шароити релефи кӯҳӣ ва набудани моделҳои муфассали рақамии биноҳо мутобик карда шудааст. Методикаи муқаммали таҳлили техникӣ-иқтисодии самаранокии дастгоҳҳои офтобии бомӣ таҳия карда шуд, ки ҳисобкунии истехсоли солони, арзиши нуруи барқ, муҳлати бозгашти сармоя ва таснифоти интегралӣ мувофиқати бомҳо дар бар мегирад.

Тавсияҳо оид ба истифода: натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд дар тарҳрезӣ ва ҷойгиркунии системаҳои офтобии болои бино, таҳияи барномаҳои рушди энергетикаи тақсимотии сатҳи шахриву минтақавӣ ва инчунин дар ҳуччатгузори соҳавӣ истифода шаванд.

Соҳаи истифода: соҳаи энергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон, аз ҷумла энергетикаи офтобӣ..

ANNOTATION
MAHMUDZODA BEKHRUZ NOZIR
ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF ROOFTOP
PHOTOVOLTAIC SYSTEMS BASED ON GEOGRAPHIC
INFORMATION SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF
TAJIKISTAN

Keywords: solar energy, photovoltaic systems, rooftop energy systems, geospatial analysis, techno-economic efficiency.

Objective: To develop a scientifically grounded methodology for assessing the effectiveness of rooftop photovoltaic systems in Tajikistan through geospatial analysis, solar irradiation modelling, and multi-criteria classification of rooftop suitability.

Research methods: The study is based on geospatial analysis using building footprint data from Microsoft Building Footprints, cartographic information from OpenStreetMap, and annual photovoltaic yield indicator PVOUT from the Global Solar Atlas (Solargis/ESMAP). Geometric parameters of rooftops were determined using the minimum bounding rectangle method and author-developed data-processing algorithms implemented in the Python programming environment.

Main results and scientific novelty: An automated algorithm for determining the usable roof area and orientation based on the Minimum Rotated Rectangle (MRR) method has been developed. An integrated GIS-based methodology for assessing the technical potential of rooftops for solar energy installations has been proposed, adapted to complex mountainous terrain and the absence of detailed building surface models. A comprehensive techno-economic assessment methodology for rooftop solar systems has been developed, including the calculation of annual energy yield, electricity cost, payback period, and an integrated rooftop suitability classification.

Recommendations for use: The results can be applied in the design of rooftop solar installations, in the development of municipal and regional programs for distributed solar energy deployment, and within sectoral planning and energy development strategies.

Field of application: the energy sector of the Republic of Tajikistan, including solar energy

Сдано в печать 26.01.2026 г.
Подписано в печать 29.01.2026 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «Сармад -Копания»
г. Душанбе, ул. Лохути 6,1 проезд