

**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**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

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

**Научный руководитель:**  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент Национальной  
академии наук Таджикистана  
Умархон Мадвалиев

**Душанбе - 2026**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Перечень сокращений, условных обозначений.....  | 5  |
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 6  |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ<br>РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН И НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ<br>КРЫШНОГО СОЛНЕЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА..... | 15 |
| 1.1. Особенности энергетической системы Республики Таджикистан.....   | 15 |
| 1.2. Природно-климатические предпосылки развития солнечной энергетики<br>и распределённой генерации .....                                     | 20 |
| 1.3. Роль крышных фотоэлектрических систем в повышении устойчивости<br>энергоснабжения и снижении сетевых потерь .....                        | 23 |
| 1.4. Международные подходы к оценке крышного солнечного потенциала.....   | 26 |
| 1.4.1. Методы на основе лидар-сканирования и трёхмерных кадастров<br>.....  | 26 |
| 1.4.2. Использование высокоточных ЦМП и 3D-моделей застройки ...  | 28 |
| 1.5. Подходы для стран с ограниченными пространственными данными ..   | 31 |
| 1.5.1. Применение открытых геоданных.....   | 31 |
| 1.5.2. Использование спутниковых и данных реанализа по солнечной<br>радиации.....   | 36 |
| 1.6. ГИС методы в задачах оценки потенциала ВИЭ .....   | 39 |
| 1.6.1. Основы геоинформационного анализа для энергетических<br>приложений.....  | 39 |
| 1.7. Постановка задачи исследования.....  | 41 |
| Выводы по главе 1.....  | 43 |
| ГЛАВА 2. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ<br>ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ<br>СИСТЕМ .....                         | 45 |
| 2.1. Постановка задачи комплексной оценки эффективности крышных<br>фотоэлектрических систем .....   | 45 |
| 2.2. Концепция моделирования конфигурации крышных установок.....  | 47 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3. Расчёт энергетических показателей.....   | 53        |
| 2.3.1. Модель годовой выработки электроэнергии и коэффициент<br>использования установленной мощности.....                                       | 53        |
| 2.4. Экономические исходные данные для условий Республики<br>Таджикистан.....   | 54        |
| 2.4.1. Структура капитальных и эксплуатационных затрат для крышных<br>систем .....  | 55        |
| 2.4.2. Тарифы на электроэнергию, особенности расчётов и сценарии<br>изменения цен .....   | 56        |
| 2.4.3. Налогообложение, субсидии и возможные механизмы поддержки  | 58        |
| 2.5. Методика расчёта экономической эффективности.....  | 61        |
| 2.5.1. Расчёт приведенной стоимости электроэнергии.....   | 61        |
| 2.5.2. Расчёт срока окупаемости, чистой приведённой стоимости и<br>внутренней нормы доходности .....  | 62        |
| 2.6. Геоинформационная реализация методики.....   | 63        |
| 2.6.1. Архитектура алгоритма и структура ГИС-модуля.....  | 63        |
| Выводы по главе 2 .....   | 65        |
| <b>ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ К ОЦЕНКЕ<br/>ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В<br/>УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА .....</b> | <b>68</b> |
| 3.1. Оценка установленной мощности и годовой выработки по<br>административным районам.....  | 68        |
| 3.2. Детализированная оценка потенциала для города Душанбе.....   | 77        |
| 3.3. Оценка экономической эффективности и анализ чувствительности к<br>изменению тарифов и капитальных затрат .....                             | 84        |
| 3.4. Сравнение экономической рентабельности крышных ФЭС между<br>странами Центральной Азии .....  | 102       |
| 3.5. Экспериментальная валидация влияния угла наклона модулей на<br>выработку.....  | 114       |
| Выводы по главе 3.....  | 120       |

|   |     |
|---|-----|
| ВЫВОДЫ .....  | 122 |
| Рекомендации по практическому применению результатов..... | 124 |
| Список литературы .....                                   | 125 |

## **Перечень сокращений, условных обозначений**

**ЦМП** – цифровая модель поверхности

**ЦМР** – цифровая модель рельефа

**ТЭЦ** – теплоэлектроцентраль

**ПО** – программное обеспечение

**ГИС** – геоинформационная система

**ВИЭ** – возобновляемые источники энергии

**ГГР** – глобальная горизонтальная радиация

**КФЭС** – фотоэлектрическая система, установленная на крыше здания  
(крышная фотоэлектрическая система)

**ФЭС** – фотоэлектрическая станция

**ПСЭ** – приведённая стоимость электроэнергии

**ЧПС** – чистая приведённая стоимость

**ВНД** – внутренняя норма доходности

**РРП** – районы республиканского подчинения

**ГБАО** – Горно-Бадахшанская автономная область

**ГЭС** – гидроэлектростанция

**ЦУР** – цели устойчивого развития

## 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 формирование 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, LiDAR-сканирования, трёхмерных городских и кадастровых моделей, а также высокоточных цифровых моделей поверхности. Комплексные GIS-ориентированные модели городских энергетических систем и инструменты оптимизации подробно рассмотрены в работах А. Альхамви, В. Меджруби, Т. Фогта и К. Агерт [1]. Влияние пространственного городского контекста и трёхмерной застройки на потенциал солнечной генерации зданий с использованием 3D-ГИС проанализировано Р. Машете, А. П. Фалканом, М. Г. Гомешем и А. М. Родригешем [2]. Систематизированный обзор современных GIS-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 энерготехника (2.3.3 – Энергоустановка 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, трёх глав, выводов и списка литературы. Объем работы составляет 144 страниц текста, включая 18 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 137 источников.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН И НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КРЫШНОГО СОЛНЕЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА

## 1.1. Особенности энергетической системы Республики Таджикистан

Электроэнергетика в Республике Таджикистан является составляющей частью промышленного и сельскохозяйственного производства, неотъемлемой частью систем жизнеобеспечения граждан, а также образования, транспорта и телекоммуникации. *«Республика Таджикистан обладает потенциальными запасами гидроэнергоресурсов, занимая первое место в мире по удельным запасам на единицу территории. В настоящее время, гидроресурсы обеспечивают более 95% потребностей страны в электроэнергии. Энергетический сектор играет важнейшую роль в экономическом развитии. Доля энергетических затрат в общем объеме ВВП составляет около 4%. Электроэнергетическая система Таджикистана состоит из генерирующих мощностей, включая ГЭС, ТЭЦ, ВИЭ, подстанций, передающих и распределительных сетей»* [9]. Энергетическая система Таджикистана характеризуется преобладающей ролью гидроэнергетики и сопутствующими сезонными дисбалансами производства и потребления электроэнергии. Известно, что по гидроэнергетическим запасам, Таджикистан занимает одно из первых мест в мире. Потенциальные ресурсы гидроэнергии в республике составляют свыше 527 млрд. кВт·ч., но при этом сегодня используется только 5 % данных ресурсов. Более 90% электроэнергии в стране вырабатывается на гидроэлектростанциях (ГЭС). В 2024 г. из ~22,2 млрд кВт·ч общей генерации на долю гидроэнергии приходилось ~20,5 млрд кВт·ч (92%), а оставшаяся часть обеспечивалась тепловыми установками (Рисунок 1.1.).

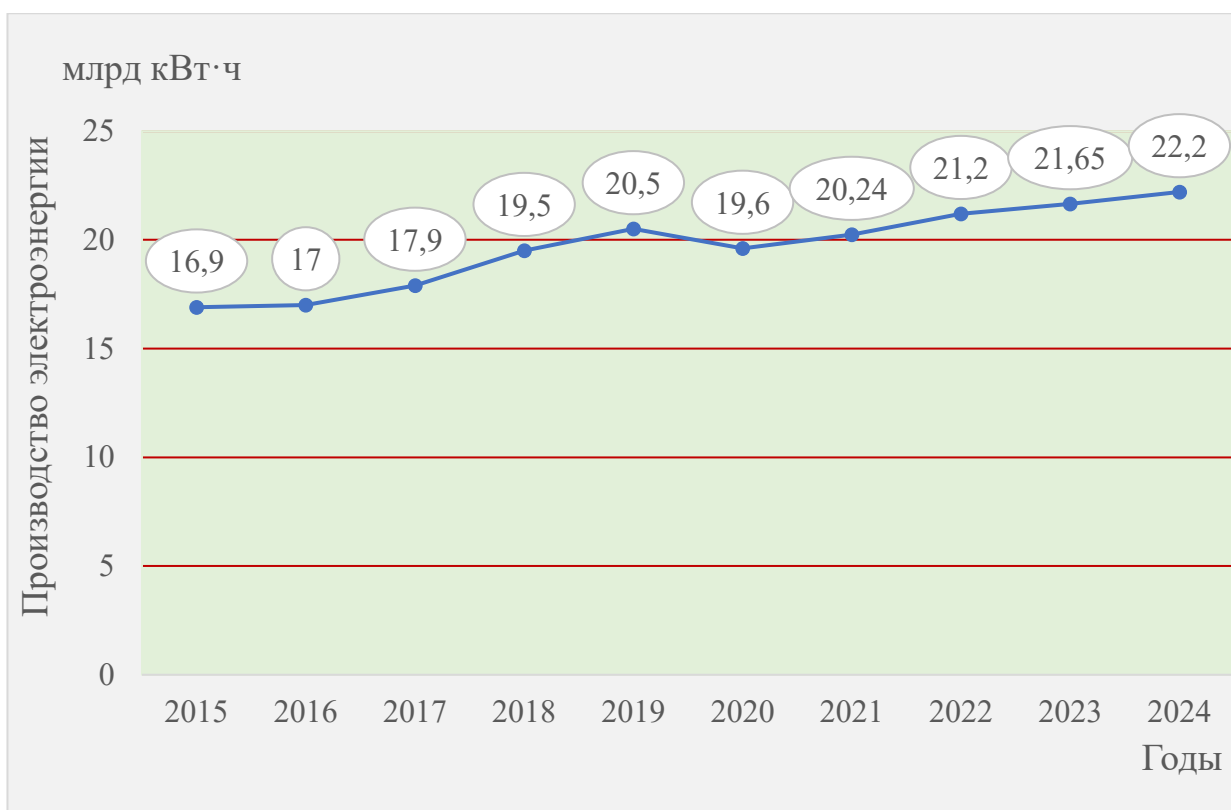


Рисунок 1.1. – Динамика роста производства электроэнергии в Республике Таджикистан за 2015- 2024 г [9]

Такая односторонняя структура генерации делает энергосистему крайне уязвимой к сезонным колебаниям водности рек и уровням водохранилищ. Летний период характеризуется избытком мощности (генерация превышает внутренний спрос и создаёт потенциал для экспорта), тогда как зимой наблюдается острый дефицит электроэнергии. Суммарно за год Таджикистан остаётся нетто-экспортёром электроэнергии, однако в холодные месяцы внутреннее производство не покрывает спрос. Проблема сезонного дефицита в последние десятилетия усугубляется ростом потребления. Основной мерой вынужденного реагирования на зимние нехватки стали лимитирования и веерные отключения, особенно затрагивающие сельские районы [10].

Причины дефицита лежат в природных особенностях гидроресурсов: зимой сток рек снижается, гидроагрегаты работают на пониженной мощности, и фактическая доступная мощность значительно меньше установленной. Таким образом, резерв по установленной мощности не решает проблему пикового спроса в холодное время года [9].

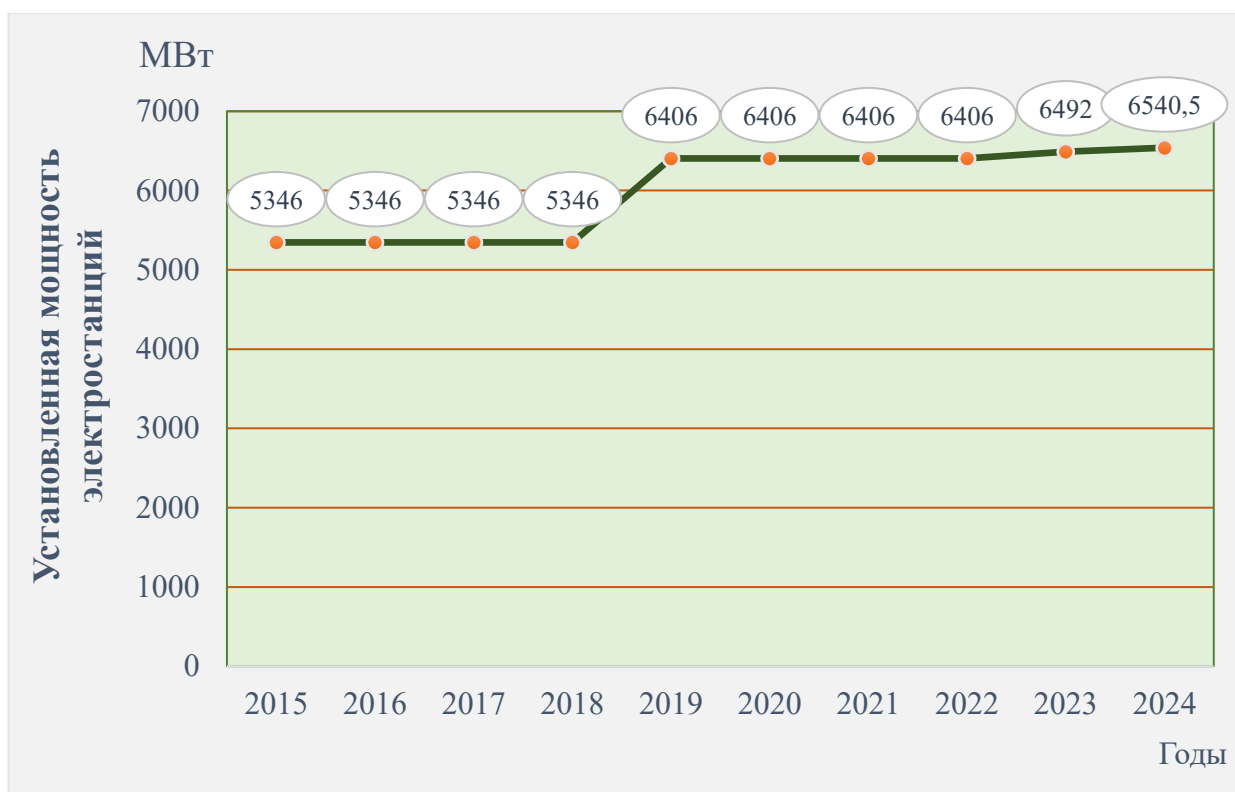


Рисунок 1.2. – Установленная мощность электростанции РТ [9]

Наряду с недостатком генерирующей мощности в зимний сезон, остроту проблемы повышают значительные потери в электрических сетях и ограниченные возможности передачи энергии между регионами. Сети и оборудования во многом устарели; суммарные потери электроэнергии при передаче и распределении её составляют порядка 19-20% выработки, стабильно держа этот высокий уровень на протяжении последних двух десятилетий [10-11]. Для сравнения, в развитых странах потери составляют около 6–8%. Такие потери эквивалентны примерно 2-3 млрд кВт·ч. ежегодно и фактически “съедают” значимую долю производства. К 2019 г. была введена в эксплуатацию новая угольная ТЭЦ “Душанбе-2” (мощностью 400 МВт), призванная смягчить зимний дефицит за счёт сжигания местного угля. В итоге доля угля в общем энергопотреблении выросла до ~ 26% (2020 г.), хотя ещё десятью годами ранее была ниже 3% [10].

Правительство предпринимает комплекс мер для решения проблемы сезонного энергетического дефицита. К стратегическим направлениям относятся: (1) наращивание генерирующих мощностей, прежде всего, за счёт

крупных ГЭС, (2) модернизация и развитие электрических сетей, включая строительство внутренних линий для перетока энергии между регионами, (3) диверсификация структуры производства энергии за счёт новых источников, включая возобновляемые, и (4) региональная интеграция энергосистем с соседними странами.

*«В целях освоения и использования возобновляемых источников энергии на территории Республики Таджикистан и повышение электроэнергообеспечения населения отдаленных и высокогорных районов, повышение экономической и энергетической эффективности вводимых в работу малых электростанций и создание условий по оперативному обслуживанию существующих малых электростанций, их ремонту, а также возможному производству оборудования для МГЭС в Таджикистане, Правительством Республики Таджикистан принято Постановление № 795 от 30 декабря 2015 года о «Программе освоения возобновляемых источников энергии и строительства малых гидроэлектростанций на 2016-2020 годы» [9].*

Ключевым проектом является достройка Рогунской ГЭС на реке Вахш – гигантского гидроузла мощностью 3600 МВт (первые агрегаты ( $2 \times 600$  МВт) пущены в 2018–2019 гг.) [12]. Ожидается, что введение в эксплуатацию Рогунской ГЭС позволит полностью покрыть внутреннюю потребность зимой и создать профицит для экспорта летом.

*«В годы независимости в Республике Таджикистан в сфере электроэнергетики было реализовано 20 инвестиционных проектов на общую сумму более 2,0 млрд. долларов США, которые внесли неоценимый вклад в развитии сектора. Важнейшими достижениями отрасли являются введение в эксплуатацию новых мощностей для выработки электроэнергии, таких как «Сангтудинская ГЭС-1» (670МВт), «Сангтудинская ГЭС-2» (220МВт) и малые гидроэлектростанции (30МВт), строительство электрических подстанций 500кВ «Душанбе-500», Сугд-500, установка закрытого распределительного устройства с элегазовой изоляцией-500 кВ на Нурекской*

ГЭС, линия электропередачи 500к «Юг- Север» (протяженностью 263,8 км), линия электропередачи 500 кВ в районах республиканского подчинения (200 км), электрические подстанции 220 кВ «Лолазор», «Хатлон», «Айни», «Шахристан», «Шахринав», «Геран-2», «СЭЗ Дангара», установка закрытого распределительного устройства с элегазовой изоляцией-220 кВ на Нурекской и Кайраккумских гидроэлектростанций, линии электропередачи 220 кВ «Лолазор-Хатлон» (53,3 км), «Таджикистан-Афганистан» (116км), «ХуджандАйни» (83,2км,) «Кайраккум-Ашт» (74км), «Геран-Руми»(78км), «Кайраккум -Сугд» (63,3), «Айни-Рудаки» (95 км), «Сангтуда-СЭЗ Дангара» (16 км) и «Шар-Шар-СЭЗ Дангара» (23 км)» [9].

Наконец, важным направлением является диверсификация энергобаланса за счёт развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), помимо большой гидроэнергетики. «В Республике Таджикистан действует «Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года». В ней обозначены цели энергетического сектора. Некоторые положения стратегии в части развития электроэнергетической отрасли, обозначенные как индикаторы 10/10/10/10-500: увеличение установленной мощности генерации до 10 Гигаватт; снижение технических и коммерческих потерь в сетях до 10%; увеличение экспорта электроэнергии до 10 млрд. кВт·ч в год; диверсификация источников генерации на 10%; дополнительное получение более 500 млн. кВт·ч в год за счёт возобновляемых источников энергии и применения энергоэффективных технологий» [9,13].

«Республика Таджикистан участвует в программе CASA-1000. Проект CASA-1000 – это крупнейший энергетический проект Central Asia – South Asia (CASA). Он предполагает строительство трансграничной высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП), которая свяжет энергетические системы Кыргызстана и Таджикистана с Афганистаном и Пакистаном. Реализация проекта позволит странам организовать единый рынок электроэнергии и торговать круглый год. Кыргызстан и Таджикистан смогут каждое лето поставлять в южные страны Азии избыточное электричество в объеме 1300

*МВт. Правительство Таджикистана планирует наращивать производство экологически чистой электроэнергии. Посредством реализации Проекта CASA-1000, подключения к Объединенной энергосистеме Центральной Азии, экспорту электроэнергии по существующей линии электропередачи 220 кВ «Сангтуда – Пули-Хумри» в Афганистан, а также новой линии электропередачи 500 кВ, соединяющей две страны, Таджикистан получит инфраструктурные возможности для наращивания своего экспорта» [9].*

Таджикистан обладает большим потенциалом возобновляемой энергетики, особенно солнечной, который может быть использован для смягчения сезонных диспропорций и укрепления энергобезопасности.

## **1.2. Природно-климатические предпосылки развития солнечной энергетики и распределённой генерации**

Географическое положение и климат Таджикистана создают благоприятные условия для использования солнечной энергии. Республика расположена в пределах широт  $36^{\circ}$ - $41^{\circ}$  с. ш., что соответствует так называемому «солнечному поясу» – зоне высокой инсоляции. По данным Агентства по гидрометеорологии, среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет от 2100 до 3166 часов (в разных регионах), что эквивалентно  $\sim 260$ - $300$  солнечным дням в году [14]. Для сравнения, это сопоставимо или даже превышает показатели многих южноевропейских стран. Интенсивность суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность достигает в летние месяцы  $20$ - $25$  МДж/ $m^2$  в день, а среднегодовые значения находятся в диапазоне  $\sim 280$ – $1120$  МДж/ $m^2$  в пересчёте на месяц (от  $\sim 4$  до  $\sim 15$  МДж/ $m^2$ ·сут) в зависимости от местности [15]. Максимальные уровни инсоляции отмечаются в засушливых районах юго-запада и на высокогорном плато Памира, где разреженность атмосферы и малое количество облачности способствуют повышенному приходу солнечной энергии. Исследование [16] показало, что технический потенциал ВИЭ в Таджикистане составляет 646850 МВт – для солнечной энергии и 15557 МВт – для ветровой, при этом, экономический потенциал – 369600 и 4485 МВт, соответственно. Эти цифры

свидетельствуют об огромном резерве солнечной энергии, способной при освоении существенно дополнить долю электроэнергии, выработанной с помощью ВИЭ.

Если учесть, что около 93% территории Таджикистана занимают горы, причём высоты изменяются от 300–500 м над уровнем моря в долинах до 7500 м на пике Исмоила Сомони, то именно эта климатическая и ландшафтная разнородность территории обуславливает и неравномерное распределение солнечного потенциала. В предгорных и равнинных регионах (например, в долине реки Вахш, на юге и юго-западе) климат близок к субтропическому континентальному: очень жаркое сухое лето и мягкая зима, количество солнечных часов максимально. В высокогорьях (Горный Бадахшан, Туркестанский, Зеравшанский хребты) климат резко континентальный, с холодной длинной зимой, однако зимой нередко устанавливается ясная погода, что при малой толщине атмосферы обеспечивает интенсивную инсоляцию даже в морозные дни. В таких районах (например, Мургаб) на высотах 3000–4000 м продолжительность солнечного времени составляет до 2800–3100 часов в год, и, хотя зимой день короток, солнечной энергии достаточно для выработки электроэнергии в дневные часы. Наконец, в северных районах (Согдийская область, Ферганская долина) климат умеренно континентальный с жарким летом; там также отмечается высокая годовая продолжительность солнечного сияния (близкая к 2800 ч.). Таким образом, практически на всей территории республики наблюдается высокий уровень ресурса солнечной радиации, особенно в летний период. Это создает естественные предпосылки для развития как сетевой солнечной генерации, так и автономных фотоэлектрических систем [17, 18].

Особое значение солнечная энергетика приобретает в контексте распределённой генерации для удалённых и труднодоступных населённых пунктов. Рельеф Таджикистана осложняет развитие единой электрической сети: многие села расположены в горных долинах, оторванных от основных линий электропередачи. Строительство ЛЭП на сотни километров через

перевалы экономически нецелесообразно для электрификации небольших поселений. В таких условиях автономные возобновляемые источники солнечные панели, небольшие ветрогенераторы, а также микро-ГЭС становятся оптимальным решением энергоснабжения на местном уровне. Практический опыт последних лет это подтверждает. Так, в Горно-Бадахшанской автономной области реализуется проект сельской электрификации при поддержке Всемирного банка: десятки отдалённых кишлаков получают энергию от локальных солнечных электростанций с накопителями и мини-ветровых установок вместо строительства линий от центральной сети. Первый пилотный объект солнечная электростанция мощностью 200 кВт в Мургабском районе введён в строй в 2020 г. (в 2024 увеличен до 800 кВт), успешно обеспечивает круглогодичное энергоснабжение близлежащих посёлков совместно с существующей малой ГЭС [18].

Установка солнечных панелей на крыше здания с аккумуляторной батареей позволяет хотя бы частично покрыть собственные потребности и сгладить пики нагрузки на сеть. Уже сегодня тысячи мелких солнечных установок используются населением. Реальное использование солнечного потенциала пока находится на начальной стадии (<1% выработки). Вместе с тем техническая пригодность крыш и территорий для размещения фотоэлектрических систем в целом высокая: большинство индивидуальных жилых домов в регионе представляют собой одно-двухэтажные строения с плоской или скатной крышей, способной выдержать нагрузку солнечных панелей. В городах значительный интерес представляет использование плоских крыш многоквартирных домов и учреждений, а также навесов и пустующих территорий под солнечные модули. Таким образом, природно-климатические условия Таджикистана обилие солнечной радиации, разнообразие рельефа с высокими инсоляционными плато, а также рассредоточенность потребителей – формируют объективные предпосылки

для развития солнечной энергетики и распределенной (децентрализованной) генерации.

### **1.3. Роль крышных фотоэлектрических систем в повышении устойчивости энергоснабжения и снижении сетевых потерь**

Развитие распределённой генерации на базе крышных фотоэлектрических систем (ФЭС) может принести Таджикистану ряд важных преимуществ с точки зрения надёжности и эффективности энергоснабжения. Во-первых, локальная генерация непосредственно у потребителя существенно уменьшает нагрузку на линии электропередачи и трансформаторы, тем самым сокращая потери энергии на ее транспортировку. В традиционной централизованной системе до 15% электроэнергии теряется при передаче от электростанций к конечным потребителям. Распределённая же генерация позволяет частично или полностью питать нагрузку на месте выработки. Каждый кВт·ч, произведённый на крыше дома и сразу там же потреблённый, эквивалентен даже большему объёму, сгенерированному на удалённой ГЭС, учитывая неизбежные потери по пути. Для Таджикистана с его протяжёнными сетями в сельской местности снижение потерь на передачу особенно актуально.

Во-вторых, распределённые солнечные системы повышают устойчивость и надёжность энергоснабжения, дополняя централизованные источники и страхуя потребителей от перебоев. Крышные ФЭС способны обеспечивать электроэнергией объекты даже в случае аварийного отключения внешней сети (при наличии автономного режима или системы накопления энергии). В городских условиях высокая доля солнечных крышных фотоэлектрических установок может разгрузить сетевую инфраструктуру в часы пикового спроса, снижая риск перегрузок и аварий. Например, если днём значимая часть электроэнергии в жилом секторе будет вырабатываться за счёт ФЭС, то центральная сеть сохранит резерв пропускной способности для вечернего максимума или внештатных ситуаций. В условиях Таджикистана, где центральная генерация зависит от гидрологических факторов и единичных

крупных ГЭС, наличие альтернативных рассредоточенных мощностей (солнечных, ветровых, малых ГЭС) сделает систему более гибкой и адаптивной к внешним изменениям (засухам, авариям на ГЭС, колебаниям импорта топлива и т. д.).

В-третьих, локальное производство электроэнергии способно обеспечить более рациональное использование ресурсов и повысить эффективность энергетической системы в целом. Крышные солнечные станции генерируют электроэнергию там, где она потребляется, что помимо устранения потерь также уменьшает необходимость в дорогостоящем увеличении пропускной способности сетей. Каждый дом или предприятие с собственной ФЭС частично превращается из пассивного потребителя в активного “производителя” энергии, разгружая общую систему. Масштабное внедрение таких моделей в перспективе позволяет отсрочить или избежать строительства новых линий электропередачи и подстанций для покрытия растущего спроса – это особенно ценно для сельских регионов и горных районов, где инфраструктурные проекты обходятся очень дорого. Более того, выработка электроэнергии из солнечного излучения происходит без топлива и выбросов, что положительно сказывается на экологической ситуации и экономит условное топливо (уголь, газ), которое иначе пришлось бы сжигать на ТЭЦ в зимний период дефицита. Хотя вклад солнечных крышных фотоэлектрических систем в энергобаланс Таджикистана пока мал, их развитие вписывается в мировую тенденцию роста децентрализованной генерации, и стратегические документы страны предусматривают увеличение мощности ВИЭ (солнечных, ветровых, биоэнергетических) не менее чем на 10% к 2030 г.

Наконец, распределённая солнечная генерация открывает широкие возможности для применения современных научных подходов в планировании и управлении энергосистемой. Одной из ключевых задач является оптимальное размещение и интеграция множества мелких ФЭС в существующие сети, чтобы максимизировать выгоды (уменьшение потерь,

улучшение надежности) и минимизировать возможные отрицательные эффекты (например, колебания напряжения при изменчивой генерации). Для решения этой задачи активно используются геоинформационные системы (ГИС). С помощью ГИС можно с высокой точностью оценить солнечный потенциал каждой отдельной кровли или участка: существуют цифровые модели местности и городских кварталов, позволяющие рассчитать угол наклона и ориентацию крыш, затенение от окружающих объектов, дневной и сезонный ход инсоляции. На основе этих данных строятся карты пригодности размещения солнечных панелей. В результате формируются научно обоснованные рекомендации, где и в каком объёме целесообразно развивать крышные ФЭС, чтобы добиться максимального эффекта. К примеру, в работе [8] показано применение ГИС-инструментов совместно с интуиционистским нечетким методом для выбора оптимальных зон размещения солнечных электростанций: учитывались критерии рельефа, солнечная радиация, близость к линиям электропередачи и др., что позволило выделить наиболее подходящие локации из множества альтернатив. Подобные подходы могут быть адаптированы и для городских условий – оценки потенциала городских крыш. Уже реализованы пилотные проекты “солнечных карт” городов, где для каждого здания рассчитывается возможная мощность солнечных панелей и годовая генерация с учётом теней и климата.

Применение ГИС в контексте энергосистемы Таджикистана позволит качественно оценить эффективность внедрения крышных ФЭС. Можно выявить, в каких районах и на каких объектах установка солнечных панелей даст наибольший вклад в покрытие местного спроса и снижение потерь – например, это могут быть территории с постоянным дефицитом электроэнергии зимой, отдалённые от крупных подстанций, но обладающие хорошим солнечным ресурсом. Также может быть проведён учёт структурных ограничений: прочности крыш, доступности для обслуживания, наличия рядом нагрузок, способных потребить дневную генерацию. В литературе отмечается, что правильная интеграция децентрализованных источников

(таких как солнечные фотоэлектрические системы) способна одновременно повысить надёжность системы и её экономическую эффективность.

Крышные фотоэлектрические системы могут играть важную роль в повышении устойчивости энергоснабжения Таджикистана, снижая нагрузку на перегруженные сети, сокращая потери энергии и создавая гибкость для покрытия дефицита, особенно в сочетании с другими мерами (накопителями энергии, управлением спросом). Их оценка с использованием инструментов ГИС позволит максимально эффективно реализовать заложенный в них потенциал на благо энергетической безопасности страны.

#### **1.4. Международные подходы к оценке крышного солнечного потенциала**

Развитые страны и города накопили значительный опыт в оценке потенциала солнечной фотоэлектрической энергетики на крышах зданий. Основу таких оценок составляют пространственно-географические данные высокой детализации – результаты лазерного сканирования местности и трёхмерные градостроительные кадастры, а также высокоточные цифровые модели поверхности (ЦМП) и 3D-модели зданий. Современные методы позволяют учесть геометрию каждой крыши (площадь, уклон, азимут), затенение от окружающих объектов и локальный уровень солнечной радиации, что обеспечивает точные оценки выработки электроэнергии от потенциально устанавливаемых солнечных панелей. Ниже рассмотрены ключевые группы методов, применяемых за рубежом.

##### **1.4.1. Методы на основе лидар-сканирования и трёхмерных кадастров**

*«На сегодняшний день существуют различные методы сбора пространственной информации о местности, такие как тахеометрическая съемка, аэрофотосъемка, наземное, мобильное и воздушное лазерное сканирование (ВЛС), радиолокационные, космические и другие виды съемок. Для получения метрической информации о местности больших по площади застроенных территорий с высокой точностью и оперативностью эффективным методом является лидарная съемка. На современных топографических картах отображается плановое положение различных*

*объектов ситуации, таких как автодороги, одиноко стоящие деревья, ограждения и др. Объектами, несущими основную нагрузку на городском плане, являются здания. С использованием данных воздушного лазерного сканирования можно отобразить не только плановое положение строений, но и их пространственные (3D) модели, которые позволят специалистам эффективнее решать задачи, связанные с благоустройством и планированием территорий» [19].*

Лазерное сканирование широко используется для построения детализированных трехмерных моделей городов и, в частности, для оценки солнечного потенциала крыш. Лидар предоставляет облако точек с измерениями высот, что позволяет автоматически реконструировать форму и ориентацию крыш зданий, а также выявлять затеняющие объекты (например, соседние строения, деревья). В сочетании с данными кадастров (контуры зданий, высота этажей и др.) это даёт возможность рассчитывать доступную для панелей площадь крыши и её освещённость в течение года. Так, в Швейцарии [20] был реализован «солнечный кадастр» города Женевы, основанный на данных аэро-лидар, 2D/3D кадастров и моделировании солнечной радиации. Данный подход позволил автоматически вычислить глобальную солнечную радиацию на каждой крыше и фасаде в масштабах всего города, что успешно подтверждено полевыми измерениями. Высокая точность лидар-методов отмечается и в обзорах, где интеграция лидар с ГИС даёт точные оценки потенциала крышных ФЭС по сравнению с более упрощёнными подходами [21-34].

Во многих странах уже проведены лидар-сканирования местности, и их данные открыты для пользования. Например, в Великобритании в открытом доступе имеется совмещённая цифровая модель поверхности с разрешением 1 м, покрывающая ~ 99% территории Англии [35]. Подобные данные доступны для Шотландии, Люксембурга, ряда городов США и других территорий [36]. Это создаёт основу для массовых оценок солнечного потенциала крыш. Исследования демонстрируют эффективность лидар-подхода на разных

уровнях: от отдельных городов до национального масштаба. В США проведена оценка национального технического потенциала крышных ФЭС на основе выборочного лидар-сканирования городов и статистического моделирования для остальных территорий. Согласно результатам, суммарно пригодно около 8,13 млрд. м<sup>2</sup> площади крыш, что соответствует порядка 1118 ГВт потенциальной мощности (что могло бы генерировать ~1432 ТВт·ч в год) при полном использовании пригодных крыш [37]. Эти цифры подчёркивают, насколько значимыми могут быть распределённые солнечные системы в энергобалансе при высоко детализированном подходе к их оценке.

Лидар часто используется совместно с трёхмерными градостроительными кадастрами. В ряде городов имеются 3D-модели зданий (например, в формате CityGML [38]), содержащие информацию о высоте строений, форме крыш и т.д. Такая информация может напрямую использоваться для расчёта освещённости крыш. В работе [37] объединили лазерное сканирование с ГИС-анализом в Шанхае, чтобы оценить влияние трёхмерной городской морфологии на распределение солнечной радиации. Результаты позволили сформировать список наиболее пригодных крышных ФЭС в плотной застройке мегаполиса.

Применение лидар ориентированных моделей продемонстрировано и на уровне больших регионов: например, для 212 тыс. зданий округа Нокс (штат Теннесси, США) рассчитан годовой потенциал выработки с учётом ориентации кровель, факторов затенения и высот зданий на основе лидар-данных [38]. Таким образом, методы на базе лазерного сканирования и 3D-кадастра сегодня считаются эталонными по точности для оценки крышного ФЭС-потенциала. Их недостатком остаются высокая требовательность к объёму данных и вычислительным ресурсам, а также ограниченная применимость в местах, где отсутствует актуальная съёмка или 3D-карты.

#### **1.4.2. Использование высокоточных ЦМП и 3D-моделей застройки**

Альтернативой прямому лазерному сканированию служит использование готовых ЦМП высокой точности, полученных различными

методами – фотограмметрией (анализ стереоснимков аэро или космической съемки), радиолокационным зондированием, либо уже упомянутым лидар. ЦМП высокого разрешения отражает рельеф местности с учётом всех наземных объектов (зданий, деревьев) и потому может применяться для расчёта солнечной экспозиции крыш и выявления затенений аналогично данным лидар. В ГИС-среде имеются инструменты, позволяющие по ЦМП вычислять суммарную солнечную радиацию за заданный период и учитывать эффект горизонта и теней. Например, модуль Solar Radiation в ArcGIS или открытый модуль r.sun в GRASS GIS рассчитывают приход энергии на каждой ячейке ЦМП с учётом окружающего рельефа и препятствий [39-42]. При наличии ЦМП с метровым разрешением и точностью по высоте ~0,5–1 м можно достаточно надёжно оценить инсоляцию крыш в масштабах города или страны. В работе [43] демонстрируют такой подход на примере Братиславы: используя общедоступную ЦМП и открытое ПО (QGIS с модулем r.sun), они провели поквартальный анализ теней от застройки и рассчитали годовую инсоляцию каждой крыши в городе. Авторы подчёркивают, что учёт теневого анализа существенно влияет на результат – без учёта взаимного затенения занижается выработка зимой на густо застроенных территориях. Методология, основанная на открытых данных и ПО, показала свою масштабируемость и воспроизводимость.

В условиях, когда отсутствует детальный лидар или актуальный 3D-каталог зданий, могут применяться упрощённые модели. Часто используют комбинацию двумерных данных о зданиях (например, контуры и высоты этажей) с типовыми предположениями о форме крыш. Так, если известна высота здания и площадь основания, можно аппроксимировать скатную крышу как двускатную или шатровую определённого уклона. Подобные правила заложены в некоторых моделях солнечного потенциала [43].

Широко используются также 3D-модели зданий, полученные альтернативными методами. В ряде городов трёхмерные модели строений создаются из комбинации ортофотопланов и высотных точек (например, метод

экструдирования контуров по высоте этажей). Точность геометрии таких моделей может уступать лидарным сканированиям, но для оценки потенциала это приемлемо. Например, в Гонконге [44] выполнена оценка ФЭС потенциала на крышах ~12000 зданий с помощью городской 3D-модели. Установлено, что при полном использовании подходящих крыш можно установить КФЭС мощностью до 5,97 ГВт, выработка которых эквивалентна 14,2% годового потребления электроэнергии города. В Европейском союзе применялся комбинированный подход: объединили данные по площади крыш и фасадов с оценками инсоляции и пришли к потенциальной возможной установке КФЭС мощностью до ~ 951 ГВт, выработкой которой можно покрыть около 22% прогнозируемого спроса на электроэнергию в ЕС к 2030 г. Эти примеры подтверждают, что даже без повсеместного лидар-сканирования высокоточные ЦМП и существующие 3D-данные позволяют получить ценные оценки распределённого солнечного потенциала [45-48].

Следует отметить, что ключевым фактором качества таких оценок является разрешение и точность модели рельефа и поверхности. При грубом разрешении (например, 30 м) мелкие детали застройки сглаживаются, и результаты по отдельным зданиям будут ненадёжны. Поэтому международные проекты ориентированы на сбор всё более детальных данных. Хорошим примером служит глобальная инициатива Microsoft [49] по картографированию зданий: к 2022 г. при помощи машинного обучения по спутниковым снимкам были определены контуры свыше 1 млрд зданий по всему миру, что существенно расширило базу данных для последующих 3D-оценок. Аналогично, проект в Китае восполнил пробел в данных по Восточной Азии, автоматически оцифровав зданий на территории 36 городов [50]. В перспективе такие данные, дополняемые глобальными моделями высот (например, SRTM, ALOS World 3D), позволят применять методы оценки солнечного потенциала крыш даже там, где отсутствует локальная высокоточная съёмка [51-73].

## **1.5. Подходы для стран с ограниченными пространственными данными**

Многие развивающиеся страны и регионы не располагают подробными геоданными о зданиях и не имеют проведённого лидар-сканирования. Тем не менее оценка потенциала солнечной энергетики актуальна и в этих условиях – для этого применяют упрощенные и открытые данные, а также глобальные модели солнечного излучения. Ниже рассмотрены подходы, ориентированные на данные открытого доступа и глобальные климатические данные, применимые в условиях дефицита детальной информации.

### **1.5.1. Применение открытых геоданных**

В отсутствие детального инвентаря строений основными источниками сведений о застройке становятся открытые геоданные глобального охвата. К ним относятся, прежде всего, краудсорсинговые и коммерческие картографические базы: OpenStreetMap (OSM) - всемирная открытая карта, содержащая контуры множества зданий, и проекты типа Microsoft Building Footprints – готовые наборы координат и полигонов зданий, полученные алгоритмами распознавания по спутниковым снимкам.

*«OpenStreetMap (дословно «открытая карта улиц»), сокращённо OSM – некоммерческий веб-картографический проект по созданию силами сообщества участников – пользователей Интернета подробной свободной и бесплатной географической карты мира. Для создания карт используются данные с персональных GPS-трекеров, аэрофотографии, видеозаписи, спутниковые снимки и панорамы улиц, предоставленные некоторыми компаниями, а также знания человека, рисующего карту. Использование для создания карт информации из несвободных сервисов, подобных Google Maps, без разрешения правообладателя запрещено. В OpenStreetMap при создании карты используется принцип вики. Каждый зарегистрированный пользователь может вносить изменения в карту. Данные проекта распространяются на условиях свободной лицензии Open Database License. До 12 сентября 2012 года использовалась лицензия Creative Commons Attribution Share-Alike 2.0. На официальном сайте OpenStreetMap нет рекламы. Проект*

*поддерживается некоммерческой организацией OpenStreetMap Foundation, существующей за счёт пожертвований» [74].*

*«Компания Microsoft выпустила несколько наборов данных контуров зданий (building footprints), все из которых лицензированы на условиях той же Открытой лицензии баз данных (Open Database License, ODbL), что и OpenStreetMap. Любой импорт этих данных должен строго соответствовать действующим правилам импорта. Наборы данных Microsoft Building Footprints доступны на большей части территории мира, включая США, Канаду, Танзанию и Уганду, а также Австралию. Контуров зданий могут быть добавлены в OpenStreetMap вручную с использованием редактора RapID либо плагина MapWithAI для JOSM. В марте 2017 года Microsoft опубликовала первоначальный набор данных, включающий около 9,8 млн высококачественных контуров зданий с указанием высоты в 44 штатах США. Покрываются ключевые агломерации и крупные городские районы. Данные были получены в результате собственных разработок Microsoft и не были приобретены или заимствованы из сторонних источников. Набор данных свободно доступен для загрузки и импорта в OpenStreetMap. Даже в регионах, где информация о зданиях уже присутствует, рекомендуется использовать эти данные, по крайней мере для уточнения высот зданий, ввиду их высокого качества. В июне 2018 года Microsoft выпустила второй набор данных, содержащий около 125 млн автоматически сгенерированных контуров зданий для всех 50 штатов США. В октябре 2020 года был опубликован набор данных, включающий 11,3 млн зданий на территории Австралии. В 2022 году Microsoft представила глобальный набор контуров зданий, полученных с применением методов машинного обучения (Global ML footprints). Визуальная тепловая карта территориального охвата данного набора данных приведена на соответствующей диаграмме компании» [49].*

Достоинство этих источников – бесплатность и доступность: они покрывают значительные территории, где традиционные кадастровые данные недоступны. Однако качество и полнота таких данных существенно различаются

в зависимости от страны. Так, по оценке [75], открытые данные OSM по зданиям имеют наивысшую полноту в Европе и Северной Америке, тогда как в Азии их охват значительно ниже – во многих районах, особенно сельских, большая часть зданий отсутствует в OSM. В случае Восточной Азии это приводило к существенным пробелам в картах застройки, что подтолкнуло к созданию специальных программ их заполнения. В целом, в странах с ограниченными данными специалисты рекомендуют сначала задействовать все доступные открытые источники национальные геопорталы, OSM, данные дистанционного зондирования для формирования базовой карты зданий. Эти данные могут быть не идеальны, но обеспечивают первичную оценку общей площади крыш, доступных для крышных ФЭС. Однако использование открытых глобальных наборов данных требует обязательной проверки их качества. Даже при высокой полноте покрытия такие источники содержат систематические ошибки, связанные с особенностями алгоритмов распознавания зданий. Это особенно характерно для автоматически генерируемых датасетов Google и Microsoft, которые формируются на основе спутниковых снимков с применением нейронных сетей. В обоих случаях встречаются ложноположительные объекты – полигоны, ошибочно выделенные на водных поверхностях, вдоль береговых линий или на участках с выраженными текстурными контрастами. Для Microsoft Building Footprints характерны массовые случаи слияния нескольких зданий в один крупный полигон, что приводит к значительному завышению реальной площади застройки. Напротив, данные Google выделяют большее число отдельных зданий, но с меньшей средней площадью (Рис 1.3.).

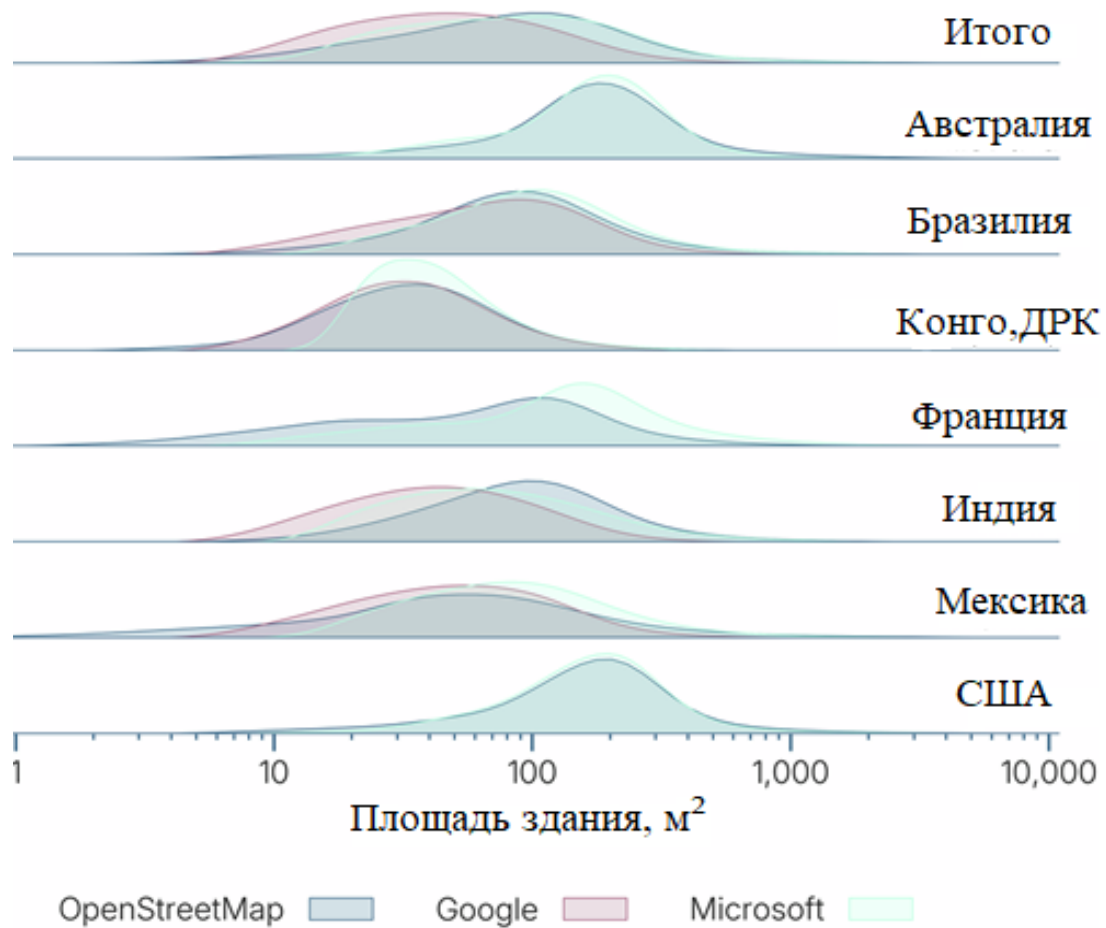


Рисунок 1.3. – Распределение площадей зданий по данным OpenStreetMap, Google и Microsoft в различных странах [75].

Поэтому перед использованием таких данных для оценки технического и экономического потенциала крышных солнечных установок необходима комплексная фильтрация: удаление объектов, попадающих в водные поверхности, устранение артефактов крайне малой площади и корректировка подозрительных многогранных объединённых полигонов. Эта предварительная очистка позволяет устранить существенную часть ложноположительных объектов и сформировать более достоверную базовую карту зданий, что критически важно для точной оценки доступной площади крыш и последующих этапов геоинформационного анализа солнечного потенциала.

Кроме контуров зданий, полезными могут быть глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР). К ним относятся, например, модель SRTM (с пространственным разрешением ~30 м) или ASTER GDEM (~30 м). Хотя их

разрешение недостаточно для различения отдельных крыш, ЦМР позволяет оценить общие характеристики территории высоту над уровнем моря, экспозицию склонов, затенённость рельефом. В сочетании с грубыми оценками средней высоты зданий по населённым пунктам эти данные могут дать представление о возможном наклоне крыш (например, в горных районах часто преобладают наклонные крыши, ориентированные по склону). Более того, глобальные модели рельефа используются для учёта маски горизонта то есть, вычисления того, насколько горы или холмы на горизонте закрывают солнце в разное время дня. В общенациональных оценках это важно: даже без точной информации о каждой крыше можно учесть, что, скажем, долина имеет меньше инсоляции из-за окружающих хребтов. Открытые инструменты (например, Solar Atlas от World Bank или сервис Helio Clim) автоматически используют глобальный рельеф для таких коррекций [76-81]. Практические примеры применения открытых геоданных для оценки солнечного потенциала уже существуют [82-88].

Важно понимать, что подходы с открытыми данными часто требуют дополнительных допущений. Например, если известны только контуры зданий, аналитики вводят средние значения этажности или площади крыши на здание по городу. Погрешность таких оценок достаточно велика – разнообразие типов зданий не учесть без подробных данных. Тем не менее для стратегических оценок на уровне страны или крупного города методика пригодна. Она позволяет идентифицировать районы с наибольшей концентрацией потенциальной солнечной генерации (например, новостройками с большими крышами или пригородами с частными домами) даже без точных цифр по каждому зданию. В международной практике разработаны рекомендации по использованию открытых геоданных: сначала максимальное задействование доступной информации, затем – при необходимости заполнение пробелов методами машинного обучения.

## 1.5.2. Использование спутниковых и данных реанализа по солнечной радиации

Оценка солнечной инсоляции является ключевым элементом расчёта ФЭС потенциала. В развитых странах нередко имеются плотные сети наземных метеостанций с пирометрами, однако в регионах с ограниченными данными таких измерений мало или они недоступны. Поэтому международная практика опирается на спутниковые и модельные данные о солнечной радиации, полученные из глобальных метеорологических наблюдений и реанализов.

**Спутниковые базы данных солнечной радиации.** Геостационарные метеорологические спутники (например, серия Meteosat над Европой/Африкой, GOES над Северной и Южной Америкой, Himawari над Азией) непрерывно снимают облачный покров Земли. На основе этих снимков по специализированным алгоритмам (таким как Heliosat) вычисляется приходящая солнечная радиация на земную поверхность. Например, в модели Solargis, используемой Всемирным банком, алгоритм включает несколько этапов: (1) расчёт так называемой *ясно-небесной* радиации по астрономическому положению солнца и известному составу атмосферы; (2) определение облачного индекса по спутниковым изображениям (насколько каждый пиксель облака затемняет солнце относительно ясного неба); (3) корректировка ясно-небесной радиации с учётом облачного индекса для получения суммарной радиации на горизонтальную поверхность. В эти расчёты также входят поправки на состояние атмосферы (аэрозоли, водяной пар) и отражённую от поверхности радиацию. В итоге спутниковая модель генерирует временные ряды солнечной энергии для каждой точки с шагом порядка 3–4 км по всей области, видимой спутником. Данные обычно покрывают период последних 20–25 лет, обеспечивая статистически достоверные средние значения и вариабельность. Пример – база данных CM-SAF (Climate Monitoring Satellite Application Facility) для Европы и Африки, которая на основе снимков Meteosat рассчитывает почасовые значения ГНІ с

1994 года. Аналогичные продукты существуют для Азии и Америк. Эти данные предоставляются бесплатно через онлайн-сервисы: Global Solar Atlas (ВБ/ESMAP), PVGIS (Исследовательский центр ЕС), NSRDB (база NREL для США и мира), SoDa и др. Они позволяют любому пользователю получить оценку средней солнечной энергии для заданных координат или карты распределения ресурса по стране [89-117].

Достоверность спутниковых оценок подтверждается многочисленными валидациями. Как правило, ошибка в определении годовой суммарной радиации не превышает 5-10% при сравнении с хорошими наземными измерениями. Однако для повышения точности практикуется калибровка спутниковых данных по местным измерениям. Если в стране есть хотя бы несколько метеостанций с данными по солнечной радиации, их используют для нахождения систематических расхождений и приведения спутниковой модели в соответствие. Например, для Замбии специалисты Solargis откорректировали модель по результатам года наблюдений на четырёх станциях, что улучшило точность оценки ресурса перед составлением атласа солнечного потенциала. В итоге выпущенный Солнечный атлас Замбии [118] содержит карты распределения среднегодовой прямой солнечной радиации и потенциальной выработки ФЭС по всей стране – эти карты стали основой для планирования солнечной энергетики, несмотря на полное отсутствие в Замбии собственной сети актинометрических измерений.

**Реанализационные климатические данные.** Другим подходом к получению сведений о солнечном излучении являются глобальные метеорологические модели, известные как реанализы. Реанализ (например, ERA5 от ECMWF, MERRA-2 от NASA, CFSR/GEOS и др.) – это реконструкция погодных параметров за длительный период (десятки лет) с использованием всех доступных наблюдений и современных моделей атмосферы [119]. Реанализы предоставляют временные ряды многих величин на регулярной сетке (обычно  $0,1^{\circ}$ – $0,75^{\circ}$ ). Преимущество данных реанализа заключается в наличии взаимосвязанных величин (температура, ветер, осадки и т.д.). Однако

пространственное разрешение обычно более грубое, чем у спутников, и модели могут сглаживать локальные эффекты (например, орографические облака). Тем не менее в масштабах большой страны данные реанализа успешно применяются для оценки распределения солнечного потенциала. Так, в работе [120] использовали метеорологический реанализ ERA с разрешением  $0,75^\circ$  для расчёта среднего распределения солнечной энергии по всей территории Китая за 1979–2017 гг. Эти данные легли в основу оценки географического потенциала ФЭС, показав значительную неоднородность: западные регионы Китая обладают куда более высоким ресурсом, чем восточные (вплоть до  $1800\text{--}2000$  кВт·ч/м<sup>2</sup> в год против  $<1200$  кВт·ч/м<sup>2</sup>). В сочетании с картой доступных земель и технико-экономическими показателями это позволило авторам определить, где сосредоточены оптимальные зоны для развития солнечных электростанций. Хотя для локальных (городских) оценок реанализ недостаточно детален, на страновом уровне он ценный источник, особенно если другие данные недоступны.

Стоит упомянуть также сервисы, интегрирующие различные источники. Например, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) сочетает спутниковые наблюдения и модели атмосферы и предоставляет пользователям удобный калькулятор выработки PV-системы с заданными параметрами в любой точке мира. Global Solar Atlas, поддерживаемый Всемирным банком, аналогично основан на спутниковой модели Solargis с адаптацией и позволяет получать как средние карты, так и оценки PVOUT (кВт·ч с 1 кВт пик) для конкретных координат. Эти инструменты незаменимы для стран, где собственные метеоданные скудны: они фактически предоставляют «виртуальные измерения» солнечного ресурса на основе глобальных данных.

Подходы, основанные на спутниковых и данных реанализа, конечно, имеют ограничения. Они менее точны при оценке конкретной площадки по сравнению с прямыми измерениями и не учитывают затенения (например, временную тень от ближнего дерева, не видимого на 3 километровом пикселе спутника). Также для расчёта реальной выработки ФЭС требуется знать

параметры панелей, угол наклона установки, возможные затенения – эти детали должны добавляться к оценке ресурса. Тем не менее на первом этапе, когда нужно оценить технический потенциал в крупных масштабах, такие данные являются единственным доступным решением в условиях дефицита локальной информации. Их успешно применяют международные организации для составления Атласов возобновляемой энергетики в разных странах, что способствует обоснованию инвестиций и политических решений даже там, где собственная инфраструктура измерений и картографирования ещё не развита.

### **1.6. ГИС методы в задачах оценки потенциала ВИЭ**

Оценка потенциала ВИЭ, таких как солнечная и ветровая энергия, требует учёта множества факторов: от природно-ресурсных (инсоляция, скорость ветра) до территориальных (наличие площадок, удалённость от сетей) и экономических (стоимость технологий, экологические ограничения). Для комплексного анализа подобных разнотипных данных широко применяются методы геоинформационного анализа. В контексте оценки потенциала ВИЭ это даёт возможность не только подсчитать теоретически доступную энергию, но и выделить оптимальные зоны для реализации проектов с учётом одновременно технических, экономических и экологических условий.

#### **1.6.1. Основы геоинформационного анализа для энергетических приложений**

ГИС представляют собой совокупность технологий и программных средств для сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации пространственных данных. В контексте энергетических исследований ГИС служит базовой платформой, позволяющей оперировать данными о местоположении и характеристиках объектов энергетической инфраструктуры и ресурсов.

На основе данных о солнечной радиации или ветровой скорости создаются карты распределения технического потенциала по территории. Например, с помощью ГИС можно построить карту, где каждой ячейке

присвоено значение среднегодовой выработки энергии с 1 кВт установленной мощности ФЭС или ветроустановки. Такие карты были получены, например, для ветрового потенциала Азии в работе [121], где по 20-летним данным 2892 метеостанций построены интерполированные GIS-карты распределения средней скорости ветра и плотности мощности ветра для 49 азиатских стран. Это позволило выделить регионы с наибольшим ветропотенциалом (восток России, степи Средней Азии, прикаспийский регион), и, напротив, области с низким потенциалом (большая часть Юго-Восточной Азии, центральные районы Китая). Аналогично, GIS-приложения создают солнечные атласы, накладывая данные инсоляции на географическую сетку.

ГИС позволяет учитывать критерии земельного характера – склон рельефа, высоту над уровнем моря, тип землепользования, охранные зоны, плотность населения и пр. – чтобы определить, какие площади реально пригодны для установки объектов ВИЭ. Например, при планировании солнечных парков исключаются территории с уклоном  $> 5^\circ$  (для крупных станций предпочтительны ровные участки), заповедные и сельхозземли, участки вблизи аэропортов (бликующие панели нежелательны) и т.д. С помощью ГИС накладываются соответствующие *маски* на карту ресурса, оставляя только допустимые зоны [8].

Современные ГИС-пакеты позволяют объединять пространственные данные с различными моделями и алгоритмами. Например, на основе 3D-моделей местности ГИС может рассчитать зоны видимости для ветроустановок или траекторию солнечных лучей для расчёта затенения. Существуют расширения ГИС для энергетики: так, в ArcGIS имеется набор инструментов Solar Analyst для оценки солнечной радиации на поверхностях с учётом рельефа и препятствий [123]. Другой пример – программный комплекс HOMER Energy, интегрирующий геоданные по ресурсу с экономическим моделированием автономных энергосистем [124]. Благодаря таким средствам исследователи могут строить сложные пространственно-временные модели: например, комбинировать карты распределения солнечного потенциала с

моделями энергопотребления по территориям для выявления дисбалансов спроса и предложения. В работе [125] отмечают, что ГИС предоставляет удобный каркас для интеграции большого объёма разнородных данных (кадастры зданий, табличные данные, удалённые неструктурированные сведения) и поддержки принятия решений в области планирования будущих энергосистем.

Результаты, полученные с помощью, ГИС, легко представить в наглядной картографической форме – будь то интерактивные веб-карты или статические атласы. Это крайне важно при коммуникации с заинтересованными сторонами и планировании политики. К примеру, так называемые солнечные кадастры городов представляют собой публично доступные карты, где каждое здание раскрашено по уровню получаемой солнечной энергии и указана примерная мощность ФЭС, которую можно установить [126-136]. Такие проекты стимулируют развитие распределённой генерации, давая домовладельцам и инвесторам первичную информацию об окупаемости солнечных установок на конкретной крыше.

Таким образом, геоинформационные методы стали неотъемлемой частью исследований в области возобновляемой энергетики. Они обеспечивают пространственный обусловленный подход, без которого невозможно эффективно оценить потенциал ВИЭ и разместить генерирующие мощности оптимальным образом. Использование ГИС особенно ценно при многокритериальном анализе, когда нужно одновременно учитывать несколько географических факторов – для этого применяются специальные методы, о которых речь пойдёт далее.

### **1.7. Постановка задачи исследования**

Анализ современного состояния энергетической системы Республики Таджикистан и международных подходов к оценке крышного солнечного потенциала показал наличие целого ряда методологических и информационных ограничений, препятствующих прямому переносу зарубежного опыта в национальные условия. В развитых странах оценка

потенциала крышных фотоэлектрических систем базируется на использовании детализированных пространственных данных: результатов лазерного сканирования местности, трёхмерных градостроительных кадастров, цифровых моделей поверхности с метровым разрешением, а также полноценных кадастров зданий и инженерной инфраструктуры. Эти данные позволяют с высокой точностью реконструировать геометрию кровель, учитывать затенение и выполнять технико-экономические расчёты для каждого здания.

В Республике Таджикистан подобная информационная база отсутствует: не проведены сплошные лидарные съёмки городов, трёхмерные кадастры находятся на начальной стадии формирования, а доступные пространственные данные о зданиях фрагментарны и зачастую представлены лишь в виде контуров из открытых картографических ресурсов. Вместе с тем страна характеризуется значительным солнечным ресурсом, высокой сезонной неравномерностью выработки гидроэлектростанций и наличием устойчивого дефицита мощности в осенне-зимний период, что объективно повышает актуальность распределённой генерации на основе крышных фотоэлектрических систем.

В этих условиях центральная научная проблема настоящего исследования формулируется как необходимость разработки и обоснования специализированной методики оценки эффективности крышных фотоэлектрических систем в условиях ограниченности пространственных данных, характерной для Республики Таджикистан, с использованием инструментов геоинформационного анализа.

**Указанная проблема включает несколько взаимосвязанных аспектов:**

- необходимость адаптации международных подходов к оценке крышного солнечного потенциала к ситуации, когда отсутствуют лидарные данные и полноформатные трёхмерные кадастры;

- необходимость выработки процедур использования открытых геоданных (контуры зданий, глобальные цифровые модели рельефа, спутниковые данные по солнечной радиации) для реконструкции геометрии крыш и оценки доступной площади размещения фотоэлектрических модулей;
- необходимость построения геоинформационной модели, позволяющей интегрировать пространственные и экономические параметры;
- необходимость учёта совокупности факторов, определяющих эффективность и приоритетность внедрения крышных фотоэлектрических систем в различных типах городской застройки и в разных регионах страны.

Исходя из изложенного, цель исследования заключается в разработке, верификации и практическом применении методики оценки технической и технико-экономической эффективности крышных фотоэлектрических систем на основе геоинформационного анализа в условиях ограниченной доступности пространственных данных Республики Таджикистан.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующей комплексной задачи исследования, которая и формирует постановку задачи диссертационной работы: разработать научно обоснованную методику оценки потенциала и эффективности крышных фотоэлектрических систем, опирающуюся на доступные открытые геоданные и глобальные климатические ресурсы, обеспечивающую возможность пространственно детализированного анализа для городов и регионов Республики Таджикистан, и продемонстрировать её применимость на примере типичных объектов городской застройки.

### **Выводы по главе 1**

1. Энергосистема Республики Таджикистан имеет ярко выраженную моно профильную структуру: более 90% выработки электроэнергии обеспечивается гидроэлектростанциями. Зимой фактически доступная мощность снижается, что приводит к устойчивому сезонному дефициту и ограничению электроснабжения.

2. Уровень потерь в электрических сетях составляет порядка 19-20% годовой выработки, что сопоставимо с годовым потреблением целого региона. В сочетании с сезонным снижением стока рек это усиливает дефицит мощности в осенне-зимний период и повышает требования к повышению эффективности и развитию распределённой генерации.
3. В отличие от развитых стран, где применяются лидар-съёмка, трёхмерные градостроительные кадастры и цифровые модели поверхности с метрическим разрешением, в Таджикистане исходная база представлена фрагментарно: контуры зданий из открытых геоданных, глобальные цифровые модели рельефа и спутниковые климатические базы. Это исключает прямое использование «эталонных» зарубежных методик и требует адаптированных решений, ориентированных на работу в условиях неполных и неоднородных данных.
4. Выявлено ключевое противоречие между высокой энергетической значимостью развития крышной солнечной генерации для компенсации сезонного дефицита и снижения потерь, с одной стороны, и отсутствием детализированных пространственных данных и адаптированных методик количественной оценки – с другой. Это обуславливает необходимость разработки геоинформационной методики оценки технической и технико-экономической эффективности крышных фотоэлектрических систем в условиях ограниченности данных Республики Таджикистан, что и определяет цель и предмет дальнейшего исследования в последующих главах диссертационной работы.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **2.1. Постановка задачи комплексной оценки эффективности крышных фотоэлектрических систем**

Развитие распределённых солнечных фотоэлектрических систем (СФЭС) на крышах зданий рассматривается как одно из перспективных направлений повышения устойчивости энергоснабжения, особенно для развивающихся стран и удалённых регионов. Республика Таджикистан обладает одним из самых высоких уровней солнечного ресурса в Центральной Азии (среднегодовая инсоляция  $\approx 1800 - 2000$  кВт·ч/м<sup>2</sup>), что делает внедрение крышных СФЭС технико-экономически обоснованным. Однако, несмотря на значительный потенциал, фактическая доля солнечной генерации на крышах в энергобалансе страны остаётся крайне низкой. Это обусловлено рядом барьеров: институциональными ограничениями, недостатком инвестиционных механизмов, и, в особенности, отсутствием надёжных инструментов для пространственной оценки пригодности зданий для установки солнечных панелей. Низкие регулируемые тарифы на электроэнергию (в среднем  $\sim 0,032$  долларов США/кВт·ч для населения) и отсутствие устойчивых финансовых схем существенно ограничивают экономическую привлекательность подобных проектов. Даже при высоком техническом потенциале солнечной генерации, экономическая эффективность крышных СФЭС остаётся под вопросом без механизмов поддержки: современные исследования показывают, что при отсутствии стимулирующих тарифов и субсидий большинство проектов имеют отрицательную чистую приведённую стоимость (ЧПС). Таким образом, для обоснования внедрения крышных СФЭС требуется комплексная методика, учитывающая как технические, так и экономические показатели в контексте местных условий.

В настоящее время в международной практике разработаны методики оценки солнечного потенциала крыш, опирающиеся на детальные геоданные

– трёхмерное лазерное сканирование, ЦМП, кадастровые информационные системы и др. Такие подходы позволяют с высокой точностью учитывать уклон и ориентацию кровель, затенение от окружающих объектов и рассчитывать потенциальную генерацию. Однако применение подобных моделей затруднено в Таджикистане, где отсутствует достаточная картографическая детализация и данные о зданиях. В условиях ограниченности исходных данных требуется альтернативный, но научно обоснованный подход, основанный на открытых и воспроизводимых данных. Одновременно появляется потребность во включении экономической составляющей: важно учитывать местную тарифную политику, структуру затрат и возможные меры поддержки, поскольку технико-экономическая эффективность СФЭС чувствительна к локальным тарифам и макроэкономическим условиям. Таким образом, задача комплексной оценки эффективности крышных фотоэлектрических систем сводится к интеграции результатов технического моделирования потенциала солнечной генерации с анализом экономической целесообразности проекта.

Целью данной главы является разработка методики комплексной технико-экономической оценки эффективности крышных СФЭС, адаптированной к условиям Республики Таджикистан. Для обеспечения воспроизводимости и практической применимости методика должна сочетать доступные открытые геопространственные данные (контуры зданий, климатические показатели солнечной радиации) с моделированием выработки электроэнергии и последующей экономической оценкой проектов. В соответствии с поставленной целью, методика включает: (1) определение доступной площади крыши и конфигурации установки фотоэлектрических модулей; (2) расчёт ожидаемой годовой генерации электроэнергии и ключевых энергетических показателей (например, коэффициента использования установленной мощности); (3) оценку затрат (капитальных и эксплуатационных) и экономических показателей; (4) формирование системы критериев пригодности крыши, охватывающей технические, экономические и дополнительные факторы; (5) реализацию предложенного алгоритма в

геоинформационной системе (ГИС) для автоматизированной оценки большого массива зданий. Данная методика призвана восполнить нехватку адаптированных решений для оценки солнечного потенциала крыш в Таджикистане и обеспечить базис для обоснования программ поддержки и инвестиций в распределённую солнечную энергетику.

## **2.2. Концепция моделирования конфигурации крышных установок**

В целом, для реалистичной оценки крыши должны рассматриваться четыре уровня потенциала: теоретический (физический) – определяется только количеством приходящей солнечной энергии; географический – учитывает геометрию конкретной крыши и затенение окружением; технический – учитывает эффективность фотоэлектрического преобразования и технические ограничения (КПД панелей, потери, доля площади, на которую реально можно установить модули); и экономический – учитывает стоимость, тарифы и экономическую целесообразность установки. Векторные контуры зданий – это основной источник информации о площади и форме крыш. Наиболее распространённым глобальным источником таких данных является проект OpenStreetMap, (OSM) – открытая геоинформационная база, где оцифровываются дороги, здания и другие объекты на основе спутниковых снимков и иных источников. Данные OSM часто используются в научных исследованиях для оценки потенциала ФЭС на крышах. Преимущество OSM – глобальный охват и свободная доступность; недостатки – неполнота и неравномерность покрытия: в одних городах доля нанесённых зданий близка к 100%, а в других многие здания могут отсутствовать или быть оцифрованы с неточной геометрией. Кроме того, OSM содержит атрибуты зданий (например, назначение, количество этажей) лишь выборочно. Тем не менее, в условиях отсутствия официальных открытых данных по зданиям, OSM служит ценным источником.

Другим важным источником являются наборы, сформированные при помощи методов машинного обучения на спутниковых снимках. Пример Microsoft Building Footprints – проект компании Microsoft по автоматическому

распознаванию контуров зданий на аэро- и космоснимках с использованием нейросетевых алгоритмов. Microsoft открыто публикует миллионы контуров зданий для разных стран (через GitHub), что существенно дополняет OSM. В частности, Microsoft предоставила контуры почти всех зданий в США, Канаде, Австралии и ряде других регионов. В 2023 году был опубликован глобальный набор Microsoft Global Building Footprints, охватывающий многие развивающиеся страны. Такие данные также доступны свободно и могут использоваться для оценки солнечного потенциала.

Для корректной оценки потенциала крыши необходимо сначала определить, как именно могут быть размещены фотоэлектрические модули на её поверхности. Конфигурация установки включает геометрические аспекты: доступная площадь под панели, их ориентация и наклон, требуемые отступы для предотвращения затенения, а также выбор типа модулей и инверторов с соответствующим соотношением Постоянный ток / Переменный ток. На этапе моделирования конфигурации крыши формируются исходные технические параметры, на основе которых в последующих разделах рассчитываются энергетические и экономические показатели.

**Доступная площадь и коэффициент заполнения.** В реальных условиях лишь часть общей площади крыши пригодна для установки солнечных модулей из-за конструктивных препятствий (мансарды, вентиляционные шахты, антенны и пр.), требований к безопасности и необходимости оставлять сервисные проходы. Поэтому вводится коэффициент заполнения, отражающий долю кровли, на которой панели могут быть размещены эффективно. Согласно принятым допущениям, приблизительно 75–85% площади типичной крыши считается потенциально доступной под фотоэлектрические панели. В данной работе для консервативной оценки использован коэффициент пригодности 75%, то есть максимум три четверти поверхности крыши могут быть покрыты модулями. Остальная часть остаётся незадействованной для учета технических ограничений и обслуживания. Кроме того, из анализа исключаются слишком малые крыши: в условиях

Таджикистана порог минимальной площади принят 20 м<sup>2</sup> (здания меньшей площади не рассматриваются пригодными для установки СФЭС). Для крупных сооружений, напротив, могут действовать иные ограничения, связанные с сегментацией поверхности, однако в рамках методики их влияние учтено через упомянутый коэффициент заполнения.

**Междурядное расстояние и затенение.** При установке панелей под наклоном на горизонтальных или пологих крышах необходимо предусматривать отступы между рядами модулей, чтобы избежать затенения задних рядов передними. Междурядный отступ зависит от геометрии панели, угла её наклона и географической широты (которая определяет максимальный угол падения солнечных лучей зимой). Для заданной конфигурации панели можно вычислить требуемое расстояние между рядами по геометрическим соотношениям. В модели принят типовой кремниевый модуль размерами 1.775 м на 1.098 м и номинальной мощностью около 0,4 кВт (400 Вт). Допустимая доля полезной площади задаётся как:

$$A_{\text{полезная}} = A_{\text{крыши}} \times r_{\text{крыши}} \times k_{\text{затенения}} \quad (2.1)$$

где:

$A_{\text{полезная}}$  – полезная площадь кровли, м<sup>2</sup>;

$A_{\text{крыши}}$  – общая площадь кровли, м<sup>2</sup>;

$r_{\text{крыши}}$  – коэффициент пригодности (принят равным 0.75);

$k_{\text{затенения}}$  – поправка на междурядное расстояние (\*).

Последний параметр (\*) определяется на основе геометрии установки, исходя из-за недостатка данных о фактическом уклоне крыш, для упрощения предполагается, что панели устанавливаются под фиксированным оптимальным углом 30° независимо от реального уклона кровли. Этот допуск вводит некоторую погрешность, однако в отсутствие информации о каждом здании является оправданным компромиссом:

$$A_{\text{панели}} = L_{\text{панели}} \times \cos(\alpha) \times W_{\text{панели}} \quad (2.2)$$

где:

$L_{\text{панели}}$  – длина панели (1.775 м),

$W_{\text{панели}}$  – ширина панели (1.098 м),

$\alpha$  – угол наклона панели ( $30^\circ$ ).

Высота панели:

$$H = L_{\text{панели}} \times \sin \alpha \quad (2.3)$$

Зимний солнечный угол:

$$\theta_{\text{солнца}} = 90^\circ - \varphi - 23.5^\circ \quad (2.4)$$

где  $\varphi$  – широта района установки

Междурядное расстояние:

$$S_{\text{ряда}} = \frac{H}{\tan \theta_{\text{солнца}}} \quad (2.5)$$

Поправочный коэффициент на затенение:

$$k_{\text{затенения}} = \frac{A_{\text{панели}}}{A_{\text{панели}} + S_{\text{ряда}} \times W_{\text{панели}}} \quad (2.6)$$

Число устанавливаемых панелей:

$$N_{\text{панелей}} = \left[ \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{панели}}} \right] \quad (2.7)$$

**Фотоэлектрические модули.** В рамках методики используются усреднённые характеристики современных кремниевых модулей большой мощности. Предполагается, что устанавливаются стандартные панели мощностью 400 Вт при стандартных условиях, с площадью около  $1,94 \text{ м}^2$  и КПД порядка 20%. Такие модули имеют габариты  $\sim 1 \text{ м} \times 1,77 \text{ м}$  и относятся к распространённому классу 72-сегментных кремниевых панелей. Выбор одного типоразмера упрощает расчёты и отражает массовую доступность подобных панелей на рынке. Эффективность работы модулей в реальных условиях учитывается косвенно через последующие коэффициенты (ориентации, затенения и пр.), а также через интегральный показатель производительности системы. Важным параметром панели является ее температурный коэффициент: в жарком климате Таджикистана панели будут работать при повышенных температурах, что снижает их мгновенную мощность. Данный эффект в модели не учитывается отдельно, но часть

температурных потерь заложена в используемых климатических данных (PVOUT) и усреднённом значении производительности системы.

**Инверторы и электрическая схема.** Для конвертации постоянного тока, генерируемого солнечными модулями, в переменный ток сети используются сетевые инверторы. При моделировании экономической эффективности стоимость инверторов включается в общие капитальные затраты на уровне удельной стоимости за 1 кВт, без детального выбора модели инвертора. Однако при проектировании конфигурации важно учесть соотношение суммарной мощности панелей и мощности инвертора. Обычно рекомендуется немного превышать инверторную мощность по солнечному полю – так называемое DC/AC-соотношение – для более полного использования инвертора в часы непикового солнца. Типичные значения DC/AC могут составлять ~1,1–1,3 (т.е. 10–30% перегрузки по постоянному току). В работе принят коэффициент близкий к 1,2, что соответствует установке. Такой выбор отражает баланс между увеличением выработки в утренние/вечерние часы и допустимыми потерями из-за ограничений инвертора в полдень (небольшое «срезание» пиковой мощности). В результате суммарная установленная мощность системы  $P_{установленная}$ , выражаемая в киловаттах пик (кВт<sub>п</sub>, по суммарной мощности панелей), несколько превышает инверторную мощность. Тем не менее при расчёте годовой генерации (разд.3.3) за основу берётся именно  $P_{установленная}$ , поскольку данные PVOUT нормированы на 1 кВт пик фотоэлектрической установки.

$$P_{установленная} = N_{панелей} \times P_{панели} \quad (2.8)$$

Электрическая схема соединения панелей на конкретной крыше может быть реализована либо как единая массивная цепочка (стринг) модулей, подключенная к одному инвертору, либо как несколько параллельных стрингов, сходящихся к одному или нескольким инверторам (в зависимости от общей мощности установки). В общем случае, панели соединяются последовательно в стринги для достижения рабочего напряжения инвертора, а

параллельно – для наращивания тока до необходимого уровня мощности. При мульти- ориентированных кровлях (несколько скатов разной ориентации) предпочтительно либо использовать несколько инверторов / МРРТ-трекеров на разные группы панелей, либо ориентировать все панели одинаково (выбрав доминирующую ориентацию крыши) для упрощения схемы. В нашей методике для упрощения предполагается, что у каждого здания выделяется доминирующая ориентация крыши и все панели ориентированы однотипно. Это означает, что в рамках одного здания все модули объединены в одну систему и работают на общий инвертор (или группу идентичных инверторов) без учёта возможного разнопланового расположения на сложных кровлях. Такой подход обеспечивает воспроизводимость оценки на большом числе объектов ценой некоторого укрупнения схемы. В реальном проектировании возможна установка нескольких инверторов меньшей мощности на разных участках крыши, однако в масштабе городского/национального потенциала эти детали нивелируются усреднёнными показателями эффективности.

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  $\theta \in [0, 180]$ , где  $0^\circ$  соответствует северному направлению, а  $180^\circ$  - южному (оптимальному). Поправка на ориентацию рассчитывалась по формуле:

$$f_{\text{ориентации}} = \max(\cos(\theta - 180^\circ), f_{\text{мин}}) \quad (2.9)$$

где,

$\theta$  – азимут крыши в градусах,

$f_{\text{мин}}$  – минимально допустимый коэффициент ориентации (принят 0.5).

Такой упрощённый подход отражает основную зависимость выработки от ориентации и одновременно ограничивает влияние крайне неблагоприятных азимутов, учитывая диффузное освещение. При наличии

информации о наклоне крыши можно было бы скорректировать  $f_{\text{ориентации}}$  с учётом отклонения угла установки от оптимального ( $30^\circ$ ), однако из-за отсутствия этих данных в модели принято допущение фиксированного наклона панелей (см. выше), и влиянием наклона пренебрегаем.

### 2.3. Расчёт энергетических показателей

#### 2.3.1. Модель годовой выработки электроэнергии и коэффициент использования установленной мощности

Кроме ориентации, на фактическую генерацию влияет затенение от близлежащих объектов (деревья, соседние здания) и собственное затенение рядов панелей. Детальный учёт теней требует 3D-моделирования и временного анализа, что выходит за рамки возможности при масштабной оценке. Поэтому введён агрегированный коэффициент затенения  $\eta_{\text{затенения}}$  – доля генерации, сохраняющаяся после потерь на затенение. По данным литературы и исходя из опыта, для относительно свободных крыш в городской застройке ежегодные потери из-за внешнего затенения могут составлять 5–10%. В настоящей работе принят единый для всех объектов коэффициент  $\eta_{\text{затенения}} = 0,95$  (т.е. 5% потерь). Это означает, что возможно некоторый объём генерации недоучтён (в случаях совсем открытых пространств 5% потерь – завышенное допущение, а для тесной застройки с препятствиями, напротив, 5% может быть заниженным). Тем не менее такой усреднённый подход оправдан для крупномасштабного анализа и соответствует практике применения постоянного потерь на затенение в расчетах потенциала. [1-А,3-А]

$$E_{\text{годовая}} = P_{\text{установленная}} \times R_{PVOUT} \times f_{\text{ориентации}} \times \eta_{\text{затенения}} \quad (2.10)$$

Показатели качества работы – интегральный показатель производительности фотоэлектрической системы, отражающий отношение фактической выработки к теоретически возможной при работе панели в стандартных условиях. Проще говоря, показатель производительности показывает, какая часть солнечной энергии, доступной панели, преобразуется в электроэнергию, учитывая все реальные потери. В наших расчётах

показатель производительности не вводился явно как отдельная величина, однако его влияние учтено через последовательность коэффициентов.

Совокупно вышеперечисленные факторы определяют балансовый показатель качества работы. В методике он заложен имплицитно: PVOUT рассчитан обычно с допущением фиксированного набора потерь (например, ~14% системных потерь, соответствующих коэффициенту производительности порядка  $\sim 0,86$  для оптимальных условий). Дополнительно мы ввели  $\eta_{\text{затенения}}$  (ещё 5% потерь) и учитываем неидеальную ориентацию через  $f_{\text{ориентации}}$ . Таким образом, для большинства анализируемых крыш эффективный коэффициент качества работы составляет порядка 0,7–0,9 (или 70–90%). Это согласуется с реальными данными действующих установок: например, верификация модели по фактическим системам в г. Душанбе показала отклонение результатов в пределах  $\pm 10\%$  от расчетов PVGIS, что подтверждает адекватность выбора интегральных коэффициентов.

Разложение потерь «по составляющим» в конкретных цифрах может варьироваться, но в целом моделью учтены основные технические факторы, влияющие на генерацию. Конечно, ряд аспектов остался за рамками: не учитываются динамические тени от близких объектов (деревьев, труб) в разные сезоны и время суток, не учитывается разница наклонов кровли, не моделируются возможные ограничения по температуре и пыли в разных регионах (везде приняты усреднённые значения). Тем не менее для целей технико-экономической предварительной оценки предложенный подход даёт достаточно точные (с точностью  $\sim \pm 10\%$ ) результаты по годовой генерации и позволяет уверенно переходить к экономическому анализу.

#### **2.4. Экономические исходные данные для условий Республики**

##### **Таджикистан**

Прежде чем приступить к расчёту экономической эффективности крышных СФЭС, необходимо определить исходные экономические параметры, актуальные для Республики Таджикистан. К ним относятся

структура капитальных затрат на установку, ожидаемые ежегодные эксплуатационные расходы, действующие тарифы на электроэнергию для различных категорий потребителей, а также налоговые ставки, субсидии и потенциальные механизмы государственной поддержки. В данном разделе систематизированы эти данные, использованные впоследствии при вычислении показателей окупаемости.

#### **2.4.1. Структура капитальных и эксплуатационных затрат для крышных систем**

**Капитальные затраты.** Капитальные затраты на установку солнечной системы на крыше включают стоимость оборудования (солнечные модули, инверторы, опорные конструкции, кабельно-коммутационное оборудование), расходы на проектирование и монтаж, а также прочие сопутствующие издержки (транспортировка, разрешительная документация, налоги на импорт и т.д.). В условиях Таджикистана на основе рыночных данных и отчетов международных организаций [137, 1-А, 2-А] была оценена усреднённая стоимость установки в размере 820 долларов США/кВт установленной мощности. Данная величина соответствует базовой цене оборудования и работ на 1 кВт<sub>п</sub> для небольших распределённых систем. Дополнительно введён коэффициент установки  $\gamma$ , учитывающий региональные накладные расходы и возможное превышение сметы:

$$C_{\text{капитальные}} = P_{\text{установленная}} \cdot C_{\text{удельная стоимость}} \cdot \gamma \quad (2.11)$$

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

**Эксплуатационные расходы.** К эксплуатационным (операционным) затратам относятся расходы на техническое обслуживание системы в течение года: периодическая очистка панелей, проверка электрических соединений, мониторинг работоспособности, возможная замена мелких компонентов (предохранителей, средств коммуникации) и страховка оборудования. Для

распределённых СФЭС малой мощности в РТ ежегодные затраты относительно невелики и в основном представляют собой стоимость обслуживания инвертора (гарантия обычно 5-10 лет, замена может потребоваться после 10-15 лет работы) и обслуживание панелей (очистка 1-2 раза в год). По усреднённым оценкам величина операционных расходов принята -18 долларов США/кВт/год, что означает ~2,2% от капитальных затрат ежегодно и согласуется с нормативными показателями (1-3% от капитальных вложений в год на обслуживание). В расчётах эксплуатационные расходы считаются пропорциональными установленной мощности:

$$C_{\text{обслуживание}} = P \cdot C_{\text{удел.экспл.затраты}} \quad (2.12)$$

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

Итого, для дальнейших экономических расчётов будем использовать следующие базовые параметры затрат (сводные значения которых приведены в таблице 2.1)

Таблица 2.1. – Основные экономические параметры для расчёта эффективности крышных СФЭС (условия РТ)

| Параметры               | Значение                 |
|-------------------------|--------------------------|
| Стоимость установки     | 820 долларов США/кВт     |
| Коэффициент установки   | 1.20                     |
| Стоимость обслуживания  | 18 долларов США/кВт/год  |
| Тариф на электроэнергию | 0.032 долларов США/кВт·ч |
| Ставка дисконтирования  | 11 %                     |
| Срок службы установки   | 25 лет                   |
| Маржа «зелёного тарифа» | 15 %                     |

#### **2.4.2. Тарифы на электроэнергию, особенности расчётов и сценарии изменения цен**

Экономическая эффективность крышных солнечных установок во многом зависит от уровня тарифов на электроэнергию, по которым оценивается сэкономленная или проданная энергия. В Таджикистане тарифы

на электроэнергию для конечных потребителей устанавливаются антимонопольной службой при Правительстве Республики Таджикистан и отличаются по категориям потребителей. На текущий момент (2024 г.) для бытового сектора действует относительно низкий субсидируемый тариф порядка 0,032 долларов США/кВт·ч. Для промышленных и коммерческих потребителей тариф выше – около 0,09 долларов США/кВт·ч. Вышеуказанные тарифы значительно ниже мировых средних и даже ниже себестоимости генерации на многих электростанциях, что отражает социальную ориентацию тарифной политики. Низкий тариф означает, что выгода от экономии 1 кВт·ч за счёт солнечной панели также низка, что затрудняет окупаемость инвестиций без дополнительных мер стимулирования.

Особенностью расчётов в данной работе является дифференцированный подход к тарифам: здания условно разделены на бытовые потребители и коммерческие. Как указывалось, для зданий с большой площадью крыши ( $>1000 \text{ м}^2$ ) принят коммерческий тариф 0,09 долларов США/кВт·ч, для остальных – бытовой 0,032 долларов США/кВт·ч. Это важно, поскольку экономия или продажа солнечной электроэнергии на коммерческом объекте принесёт втрое больший денежный эффект за каждый кВт·ч, чем на доме обычного потребителя. В реальности тарифная политика сложнее: существуют разные тарифы по времени года/суток, льготные категории потребителей и т.д., но для упрощения используется усреднённое фиксированное значение.

Рассмотрим сценарии изменения тарифов. В рамках методики проанализированы сценарии: базовый – тариф неизменен (0,032 долларов США/кВт·ч для населения), и повышенный тариф – например, до 0,045 долларов США/кВт·ч для населения (что эквивалентно росту примерно на 40%). Такой уровень всё ещё относительно низок в абсолютных цифрах, но близок к точке безубыточности для солнечных проектов.

Таким образом, при оценке эффективности необходимо учитывать возможное изменение тарифов за срок службы системы (25 лет). В расчетах ПСЭ и ЧПС пока предполагается сохранение тарифа в реальном выражении,

однако при анализе чувствительности тариф будет варьироваться. Ещё одна особенность – в Таджикистане пока нет механизма сетевого измерения (нетто-метринга) либо официального зелёного тарифа для частных солнечных установок. То есть избыточная генерация, отдаваемая в сеть, не компенсируется владельцу по розничному тарифу. Практически это означает, что экономический эффект ФЭС для домохозяйства – это сэкономленная электроэнергия, которую иначе пришлось бы купить по 0,032 долларов США/кВт·ч. Продать излишки по этому тарифу официально нельзя, если только не будет введена специальная политика. Поэтому дальнейшие расчёты исходят из модели, где вся выработанная энергия потребляется на месте и снижает счёт за электричество. Для крупных объектов (коммерческих) потенциально возможны прямые договоры или собственное потребление внутри предприятия, поэтому там также принимается, что солнечная энергия замещает покупную по 0,09 долларов США/кВт·ч.

Что касается долгосрочного прогноза цен, он весьма не определён. Можно ожидать, что по мере инфляции и реформ тариф будет расти, приближаясь к экономически обоснованному уровню. В рамках анализа чувствительности мы можем учесть ежегодный рост тарифа, однако для упрощения сценариев большинство оценок проводится в неизменных текущих ценах. Отдельно рассматривается гипотетический сценарий стимулирующего тарифа, при котором государство выплачивает повышенный тариф за солнечную генерацию.

В сводке исходных данных закрепим, что базовые тарифы составляют 0,032 долларов США/кВт·ч (население) и 0,09 долларов США/кВт·ч (коммерция). Все экономические показатели (выручка, ЧПС, срок окупаемости) сначала рассчитываются для этих значений, а затем анализируется, как они изменятся при изменении тарифной ставки.

#### **2.4.3. Налогообложение, субсидии и возможные механизмы поддержки**

В расчетах стоимости оборудования для солнечных установок в Таджикистане учтены действующие налоги: НДС, таможенные пошлины на

импорт инверторов, а также налоговые отчисления компаний-инсталляторов. На данный момент специального освобождения от этих налогов для ВИЭ-оборудования не предусмотрено, что увеличивает эффективные капитальные затраты проектов. Например, без НДС и пошлин стоимость могла бы снизиться на 15–20%. Таким образом, текущее налоговое окружение нейтрально или даже неблагоприятно для малых СФЭС. С точки зрения эксплуатации, электроэнергия, генерируемая для собственных нужд, не облагается никакими сборами, однако если бы вводился механизм продажи излишков в сеть, важно было бы определить, облагается ли такой доход налогом или нет – на дату написания четкой схемы нет.

Прямых субсидий на установку солнечных панелей для населения или бизнеса в РФ пока не внедрено. В перспективе рассматриваются разные варианты стимулирования: льготное кредитование, гранты на установку, внедрение зелёного тарифа. Зелёный тариф – это повышенный тариф, по которому энергокомпания покупает электроэнергию, произведённую из возобновляемых источников, компенсируя разницу с обычным тарифом.

**Механизмы поддержки, учтённые в методике.** В нашей модели экономической оценки предусмотрен расчёт так называемого тарифного разрыва – разницы между ПСЭ и действующим тарифом. [2-А] Если ПСЭ выше тарифа, проект нерентабелен без поддержки; эта разница характеризует необходимый уровень субсидии. Предположим, введён *стимулирующий тариф*  $T_{green}$  на солнечную электроэнергию, устанавливаемый как

$$T_{green} = \text{ПСЭ} \cdot (1 + \delta) \quad (2.13)$$

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

$$\Delta T = T_{green} - t \quad (2.14)$$

Положительное  $\Delta T$  означает, что без доплаты проект не выходит на требуемую доходность. Для каждого здания можно посчитать годовой объём

недополученной выручки. В наших расчетах для оценки масштаба поддержки используется показатель субсидии на единицу мощности (Долларов США/кВт): он определяется как приведённая сумма необходимых выплат за весь срок службы в расчёте на 1 кВт. Фактически, это можно воспринять как разовую субсидию к капитальным затратам, эквивалентную долгосрочной тарифной поддержке.

$$S_{subsidy} = \max(0, \Delta T) \cdot E_{\text{годовая}} \quad (2.15)$$

Значения субсидий рассчитываются по каждому объекту и агрегируются на районном уровне. Эти данные используются для формирования рекомендаций по распределению государственной поддержки.

Кроме зелёного тарифа, возможны налоговые стимулы: освобождение от НДС и пошлин на солнечное оборудование, ускоренная амортизация и налоговые вычеты для коммерческих инвесторов, субсидирование процентных ставок по кредитам на ВИЭ-проекты. Все эти меры в явном виде не моделировались, однако их влияние легко интерпретировать через изменение капитальных и операционных затрат. Так, освобождение от НДС и таможенных пошлин позволит снизить капитальные затраты с 820 долларов США/кВт до ~680 долларов США/кВт (т.е. на 17%), что можно предусмотреть как отдельный сценарий модели.

В исходных данных методики заложено текущее отсутствие прямых субсидий и льгот – все цены даны с налогами, тариф низкий. Однако сама методика разработки предназначена для обоснования необходимых мер поддержки. В частности, рассчитываются тарифный разрыв и требуемый объём субсидирования, что может служить ориентиром для выработки государственной политики (например, какую доплату за кВт·ч или разовый грант на кВт<sub>п</sub> следует предоставить, чтобы стимулировать развитие крышных СФЭС). Данные этих расчетов будут представлены и проанализированы в Главе 4. Здесь же важно подчеркнуть: без изменения тарифной политики или снижения стоимости оборудования крыши с солнечными панелями в

Таджикистане в ближайшем будущем останутся малопривлекательными для частных инвесторов.

## 2.5. Методика расчёта экономической эффективности

Опираясь на определённые выше исходные данные (капитальные затраты, операционные затраты, тарифы, ставки дисконтирования), далее переходим к расчёту критериев экономической эффективности крышных солнечных фотоэлектрических систем. К основным целевым показателям относятся: ПСЭ, срок окупаемости инвестиций, ЧПС и внутренняя норма доходности. Указанные показатели обеспечивают всестороннюю оценку экономической привлекательности проекта: ПСЭ позволяет сопоставить затраты с тарифицируемой ценностью энергии; срок окупаемости отражает время возврата первоначальных вложений; ЧПС характеризует общий интегральный финансовый эффект; внутренняя норма доходности показывает эффективную доходность проекта.

### 2.5.1. Расчёт приведенной стоимости электроэнергии

По сути, ПСЭ отвечает на вопрос: какова цена 1 кВт·ч, если учесть все расходы на проект (капитальные и операционные) и «распределить» их на весь объём произведённой энергии с учётом дисконтирования денежных потоков. Формула расчёта ПСЭ может быть записана следующим образом:

$$\text{ПСЭ} = \frac{C_{\text{капитальные}} \cdot \frac{r}{1-(1+r)^{-T}} + C_{\text{обслуживание}}}{E_{\text{годовая}}} \quad (2.16)$$

где  $r = 0,11$  – ставка дисконтирования,  $T=25$  лет – срок эксплуатации установки.

Важно отметить: при расчёте ПСЭ в данной работе все затраты считаются брутто, включая налоги, а ставка дисконтирования выбрана на уровне 11% годовых (номинально, что соответствует реальной ставке при умеренной инфляции). В рамках методики дополнительно рассчитывается альтернативный сценарий себестоимости электроэнергии, основанный на снижении капитальных затрат на 20%. Его включение позволяет оценить чувствительность удельной стоимости выработки к удешевлению

оборудования либо к отмене налоговых и таможенных платежей. Такой сценарий приближённо воспроизводит условия, при которых солнечные панели и сопутствующие компоненты становятся дешевле или на их приобретение предоставляются субсидии.

### **2.5.2. Расчёт срока окупаемости, чистой приведённой стоимости и внутренней нормы доходности**

Простой срок окупаемости инвестиций определяется как время, за которое накопленный денежный поток от проекта компенсирует начальные капитальные вложения. В случае равномерной ежегодной прибыли срок окупаемости может быть оценён как отношение полного объёма капитальных затрат к величине годовой чистой прибыли (разница между доходом и операционными расходами). Доход от эксплуатации рассчитывается как произведение объёма годовой генерации  $E_{year}$  и фиксированного тарифа на электроэнергию:

$$R_{\text{годовая}} = E_{\text{годовая}} \cdot t \quad (2.17)$$

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

$$\Pi = R_{\text{годовая}} - C_{\text{от}} \quad (2.18)$$

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

$$PP = \frac{C_{\text{капитальные}}}{\Pi} \quad (2.19)$$

а в случае нерентабельного проекта (при  $\Pi \leq 0$ )  $PP$  считается бесконечным.

Другим ключевым показателем является ЧПС, которая отражает текущую ценность будущих доходов с учётом дисконтирования:

$$\text{ЧПС} = \Pi \cdot \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} - C_{\text{капитальные}} \quad (2.20)$$

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

## 2.6. Геоинформационная реализация методики

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. 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.

### 2.6.1. Архитектура алгоритма и структура ГИС-модуля

Алгоритм реализации методики можно разделить на несколько последовательных этапов (блоков), каждый из которых выполняется программно и интегрирован в единый процесс (Рис.2.1).

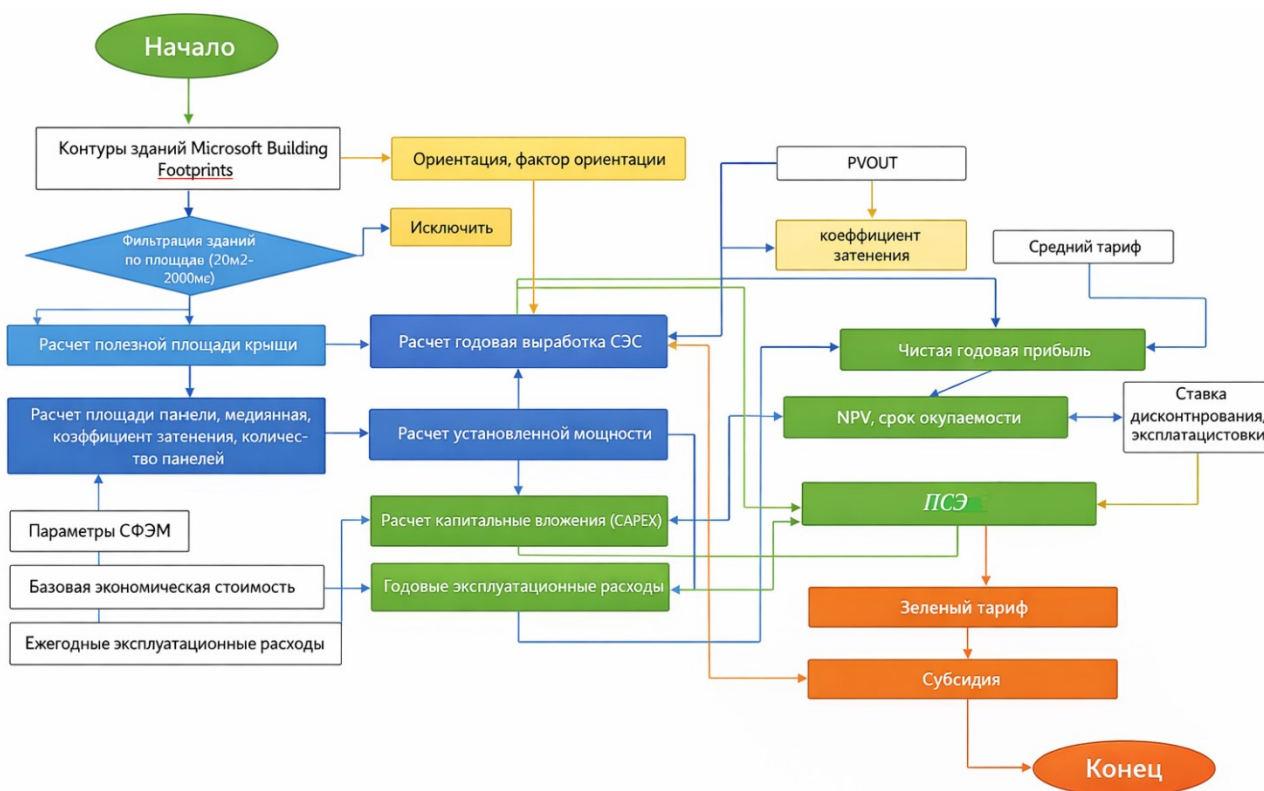


Рисунок 2.1. – Алгоритм геоинформационной реализации разработанной методики оценки солнечного потенциала крыш

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. По сути, модуль представляет собой последовательность функций, применяемых к геодатафрейму зданий. Реализована и параллелизация разбивка территории на плитки  $1 \times 1$  км и параллельный просчёт, что позволяет обрабатывать миллионы объектов эффективно. На выходе модуль формирует новый геодатафайл с исходными геометриями зданий и всеми рассчитанными атрибутами (техническими, экономическими, интегральными). Такая структура данных гибко экспортируется в ГИС-приложения для дальнейшего анализа.

В целом архитектура алгоритма обеспечивает полную автоматизацию: от исходных открытых данных (OSM/Microsoft здания) до выходных слоёв с оценкой потенциала и пригодности крыш. Это позволяет легко переносить методику на другие регионы (нужно только поменять входные данные и, возможно, экономические параметры). ГИС-модуль модифицируем: например, можно добавить учёт иных критериев (затенение по высотам, если будут данные) либо обновить по мере изменения тарифов.

Одним из главных достоинств методики является её масштабируемость и возможность обработки большого массива зданий без ручного вмешательства.

Автоматический расчёт по массиву включает также агрегацию результатов по территориальным единицам. Например, суммирование по районам: складывается количество пригодных крыш, суммарная мощность, вычисляются средние ПСЭ и т.д. В работе представлены таблицы по каждому району. Такая агрегация полезна для выявления региональных закономерностей. Алгоритм это делает пост-обработкой: сгруппировав по коду района (атрибут, присвоенный каждому зданию в соответствии с картой районов). В ГИС-модуле был интегрирован полигон административного

района, чтобы внести код ID района, с целью группировки с необходимыми статистиками.

Что касается точности и валидации, автоматизированный расчёт был проверен на отдельных известных системах (насколько это возможно). В частности, сравнивались оценки генерации с данными реальной СФЭС в г. Душанбе – расхождение порядка  $\pm 10\%$ , что подтверждает корректность алгоритма на этапе энергетического моделирования. Экономические показатели проверялись на консистентность: например, для эталонного здания ручной расчёт ПСЭ совпал с выданным модулем. Это вселяет уверенность в применимости инструмента без ручной корректировки для всего массива.

Проще говоря, ГИС-модуль позволяет взять входной набор зданий, “пропустить” их через все формулы и на выходе сразу получить готовую карту потенциала. Это превращает разрозненные данные в комплексную информационную систему о солнечном потенциале крыш. Пользователь (например, энергетическое агентство) может задать новые исходные параметры (скажем, повысить тарифы, смоделировать субсидию) и заново прогнать оценку, получив обновлённую картину.

Конечным продуктом реализации методики в ГИС является солнечный кадастр крыш – пространственная база данных, содержащая информацию о каждой крыше и её пригодности для солнечных панелей. Такой кадастр представляет большую ценность для планирования: он позволяет быстро идентифицировать лучшие места для СФЭС, оценить суммарный технический потенциал города или района, прикинуть потребный бюджет субсидий для реализации этого потенциала и т.д.

## **Выводы по главе 2**

1. Обоснована необходимость комплексной технико-экономической оценки крышных СФЭС в условиях Таджикистана: при высоком солнечном ресурсе и существенном теоретическом потенциале развитие распределённой солнечной генерации сдерживается низкими

- регулируемыми тарифами, отсутствием механизмов поддержки и дефицитом пространственных данных по застройке.
2. Сформулирована концепция многоуровневой оценки потенциала крыш (теоретический, географический, технический и экономический уровни) и показано, что в условиях отсутствия детального кадастра и 3D-моделей зданий целесообразно опираться на открытые источники – контуры зданий OpenStreetMap и Microsoft Building Footprints, дополняемые климатическими данными PVOUT.
  3. Разработана укрупнённая модель конфигурации крышных установок, включающая определение доступной площади (с использованием коэффициента пригодности крыши 0,75 и отсеечения слишком малых объектов), учёт междурядного затенения при фиксированном наклоне панелей  $30^\circ$ , выбор типового фотоэлектрического модуля мощностью 400 Вт и соотношения DC/AC порядка 1,2. Показано, что такой набор допущений позволяет получить реалистичную оценку устанавливаемой мощности при массовых расчётах.
  4. Предложена модель расчёта годовой генерации энергии на основе PVOUT с введением агрегированных поправочных коэффициентов: ориентации крыши (через анализ главных компонентов и функцию  $f_{\text{ориентации}}$ ) и затенения ( $\eta_{\text{затенения}} = 0,95$ ). Показано, что совокупное влияние принятых коэффициентов соответствует типичному диапазону показателя производительности (около 0,7–0,9) и обеспечивает точность оценки годовой выработки на уровне порядка  $\pm 10\%$  по сравнению с данными реальных установок.
  5. Систематизированы исходные экономические параметры для условий Таджикистана: структура капитальных затрат (базовая стоимость 820 долларов США/кВт с учётом регионального коэффициента установки), эксплуатационные расходы (18 долларов США/кВт·год), действующие тарифы для бытовых (0,032 долларов США/кВт·ч) и коммерческих (0,09 долларов США/кВт·ч) потребителей, ставка дисконтирования 11%, срок

службы 25 лет. Показано, что при таких исходных предпосылках экономическая эффективность крышных СФЭС существенно зависит от тарифной категории и размера объекта.

6. Сформулирована методика расчёта основных показателей экономической эффективности (ПСЭ, простой срок окупаемости, чистая приведённая стоимость, внутренняя норма доходности) для крышных СФЭС в условиях отсутствия нетто-метринга, при допущении полного самопотребления выработанной энергии. Введён подход к оценке чувствительности ПСЭ к снижению капитальных затрат (на 20%) как приближённая модель влияния субсидий и налоговых льгот.
7. Введено понятие тарифного разрыва на основе сравнения ПСЭ с действующими тарифами и предложена схема расчёта стимулирующего «зелёного» тарифа с маржей 15% к ПСЭ. Показано, что величина тарифного разрыва может служить количественной оценкой требуемого уровня поддержки (через повышенный тариф или эквивалентную разовую субсидию на кВт установленной мощности) и использоваться при обосновании государственной политики в сфере распределённой солнечной энергетики.
8. Разработанная методика реализована в виде ГИС-модуля на основе Python с автоматизированной обработкой больших массивов зданий, параллельными расчётами и последующей агрегацией результатов по административным единицам. Показано, что результатом работы модуля является формирование «солнечного кадастра» крыш с набором технических и экономических показателей по каждому объекту, пригодного для практического планирования программ поддержки и приоритизации зон внедрения крышных СФЭС.

### ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЫШНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА

#### 3.1. Оценка установленной мощности и годовой выработки по административным районам

Результаты пространственно-эксплицитного моделирования показали значительную неоднородность технического потенциала размещения крышных-фотоэлектрических систем (СФЭС) по регионам Таджикистана. Совокупная установленная мощность, рассчитанная с учётом геометрии крыш, междурядного затенения и ориентационных факторов, достигает 54 ГВт.

Агрегированные показатели, представленные в таблице 3.1, отражают исходное распределение зданий и доступной площади крыш по регионам Республики Таджикистан и служат базовой основой для последующей технико-экономической оценки потенциала крышных фотоэлектрических систем.

Таблица 3.1. – Площадь крыш по районам и городам Таджикистана

| Область | Район или город | Количество зданий | Общая площадь крыш, км <sup>2</sup> | Полезная площадь, км <sup>2</sup> |
|---------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| РРП     | Файзабад        | 41494             | 5,6                                 | 3,6                               |
|         | Гиссар          | 137286            | 18,7                                | 11,9                              |
|         | Лахш            | 302               | 2294,5                              | 902                               |
|         | Нуробод         | 34707             | 3,6                                 | 2,3                               |
|         | Рашт            | 82241             | 9,2                                 | 5,8                               |
|         | Рогун           | 28175             | 3,3                                 | 2,1                               |
|         | Рудаки          | 243596            | 31,9                                | 20,2                              |
|         | Шахринав        | 108449            | 14,3                                | 9,1                               |
|         | Сангвор         | 5328              | 0,5                                 | 0,3                               |
|         | Таджикабад      | 18542             | 1,9                                 | 1,2                               |
|         | Турсунзаде      | 137861            | 18,8                                | 11,9                              |
|         | Вахдат          | 134020            | 18,6                                | 11,8                              |
|         | Варзоб          | 81913             | 9,8                                 | 6,2                               |
|         | Душанбе         | 191261            | 29,5                                | 18,6                              |
| ГБАО    | Ишкашим         | 1129              | 0,1                                 | 0,1                               |

продолжение таблицы 3.1

| Область            | Район или город        | Количество зданий | Общая площадь крыш, км2 | Полезная площадь, км2 |
|--------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| ГБАО               | Мургаб                 | 872               | 0,1                     | 0,1                   |
|                    | Рошткала               | 3717              | 0,6                     | 0,4                   |
|                    | Рушан                  | 1738              | 0,2                     | 0,1                   |
|                    | Шугнан                 | 7909              | 1,3                     | 0,8                   |
|                    | Ванч                   | 1578              | 0,1                     | 0,1                   |
| Хатлонская область | Балджувон              | 13072             | 1,4                     | 0,9                   |
|                    | Кушониён               | 156600            | 21,5                    | 13,6                  |
|                    | Дангара                | 93337             | 10,6                    | 6,7                   |
|                    | Фархор                 | 89928             | 11                      | 7                     |
|                    | Дусти                  | 1224              | 0,1                     | 0,1                   |
|                    | Джоми                  | 100975            | 11,6                    | 7,3                   |
|                    | Ховалинг               | 25190             | 3,1                     | 1,9                   |
|                    | Хуросон                | 91261             | 10,2                    | 6,5                   |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 6885              | 0,9                     | 0,5                   |
|                    | Муминобод              | 1160              | 0,1                     | 0,1                   |
|                    | Нурек                  | 33704             | 4,1                     | 2,6                   |
|                    | Носири Хусрав          | 31890             | 3,5                     | 2,2                   |
|                    | Пяндж                  | 58919             | 7,1                     | 4,5                   |
|                    | Кабодиён               | 42042             | 5,5                     | 3,5                   |
|                    | Джайхун                | 25076             | 3,9                     | 2,5                   |
|                    | Леваконт               | 26875             | 3,2                     | 2                     |
|                    | Шахритус               | 100016            | 12                      | 7,6                   |
|                    | Темурмалик             | 42437             | 4,9                     | 3,1                   |
|                    | Вахш                   | 33838             | 3,6                     | 2,3                   |
|                    | Восеъ                  | 39437             | 5,4                     | 3,4                   |
| Яван               | 124430                 | 14,4              | 9,1                     |                       |
| Согдийская область | Ашт                    | 121575            | 13,3                    | 8,4                   |
|                    | Айни                   | 40782             | 4,6                     | 2,9                   |
|                    | Бободжон Гафуров       | 316271            | 47,5                    | 30                    |
|                    | Деваштич               | 32074             | 4,7                     | 3                     |
|                    | Исфара                 | 166773            | 22,2                    | 14,1                  |
|                    | Истаравшан             | 57634             | 9,2                     | 5,8                   |
|                    | Джаббор Расулов        | 69156             | 11,5                    | 7,3                   |
|                    | Канибадам              | 131052            | 18,9                    | 11,9                  |
|                    | Горная Матча           | 5604              | 0,5                     | 0,3                   |

| Область | Район или город | Количество зданий | Общая площадь крыш, км <sup>2</sup> | Полезная площадь, км <sup>2</sup> |
|---------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|         | Матча           | 79523             | 10,3                                | 6,5                               |
|         | Пенджикент      | 130123            | 20,6                                | 13                                |
|         | Шахристон       | 27050             | 3,4                                 | 2,2                               |
|         | Спитамен        | 73999             | 12                                  | 7,6                               |
|         | Зафарабад       | 12074             | 1,9                                 | 1,2                               |
| Итого   |                 | 3664104           | 486,8                               | 307,8                             |

Таблица 3.1. включает ключевые параметры, характеризующие структуру застройки: общее количество зданий, суммарную площадь их кровель и полезную площадь, пригодную для размещения солнечных модулей с учётом ограничений по ориентации, инсоляции и степени затенения.

Полученные результаты демонстрируют значительную региональную неоднородность. Наибольший объём доступной площади сосредоточен в районах с высокой плотностью населения и развитой жилой застройкой – в частности, в Рудаки, Бободжон Гафурове, Исфаре, Гиссаре и городе Душанбе. Эти территории формируют основную долю потенциального технико-экономического эффекта от внедрения крышных фотоэлектрических систем благодаря сочетанию крупного фонда зданий и высоких значений полезной площади крыш.

В то же время горные и малонаселённые районы, особенно в ГБАО (Ишкашим, Мургаб, Рошткала, Ванч), характеризуются существенно меньшими площадями крыш. Несмотря на высокий солнечный ресурс данных территорий, практическая реализация крупных проектов здесь ограничивается низкой плотностью застройки, что требует применения локальных автономных решений и адаптированной экономической модели.

Общая площадь крыш по стране составляет 486,8 км<sup>2</sup>, из которых 307,8 км<sup>2</sup> идентифицировано как полезная площадь, пригодная для установки фотоэлектрических панелей. Это соотношение показывает, что около 63% площади кровель может быть эффективно использовано при соблюдении

технических требований (отсутствие затенения, корректная ориентация, нормативные ограничения по несущей способности). Такой высокий уровень пригодности подтверждает важность крыши как значимого ресурса для децентрализованной солнечной генерации.

Следует отметить, что полезная площадь рассчитывается с учётом корректирующих коэффициентов, включающих геометрическую форму здания, ориентированность кровли, наличие надстроек, а также данные о среднегодовой солнечной энергии (PVOUT). Эти факторы в совокупности позволяют не только оценить технический потенциал, но и заложить основу для будущих расчётов установленной мощности, ожидаемой генерации электроэнергии и экономической эффективности проектов.

Данные таблицы 3.1 формируют количественную основу для межрегионального сравнения потенциала крышных фотоэлектрических систем и определяют базовые входные параметры для дальнейших этапов моделирования – расчёта установленной мощности, оценки годовой выработки, ориентационного коэффициента и распределения PVOUT по территориальным единицам.

Таблица 3.2 содержит агрегированные значения установленной мощности потенциальных крышных фотоэлектрических систем и соответствующую ожидаемую годовую генерацию электроэнергии по районам и городам Республики Таджикистан. Представленные результаты получены на основе полезной площади крыш, корректирующих коэффициентов ориентации, региональных значений PVOUT и удельной мощности установленного оборудования. Эти параметры позволяют сформировать обоснованную количественную оценку распределённого технического потенциала солнечной генерации на уровне территориальных единиц. Анализ данных показывает существенную межрегиональную вариативность, обусловленную плотностью застройки, площадью доступных крыш и климатическими особенностями. Наибольшие значения установленной мощности формируются в густонаселённых районах Согдийской области

(Бободжон Гафуров – 5,27 ГВт; Исфара – 2,47 ГВт; Пенджикент – 2,29 ГВт), Рудаки (3,54 ГВт), Гиссаре (2,08 ГВт), Турсунзаде (2,09 ГВт) и городе Душанбе (3,27 ГВт). Это территории с высокой долей жилой и общественной застройки, что обеспечивает значительный технический ресурс для размещения крышных СФЭС.

Таблица 3.2. – Установленная мощность и годовая генерация

| Область            | Район или город        | Общая мощность, кВт | Годовая генерация, кВт·ч |
|--------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| РРП                | Файзабад               | 624546              | 567255009,5              |
|                    | Гиссар                 | 2078812,4           | 2002073512               |
|                    | Лахш                   | 3475,6              | 3005684,235              |
|                    | Нуробод                | 397624,4            | 349925962,2              |
|                    | Рашт                   | 1013135,6           | 845435519,5              |
|                    | Рогун                  | 365468              | 312724943,9              |
|                    | Рудаки                 | 3537590             | 3229103745               |
|                    | Шахринав               | 1587800,8           | 1504775201               |
|                    | Сангвор                | 54844,8             | 42720760,97              |
|                    | Таджикабад             | 205380,8            | 163689788,4              |
|                    | Турсунзаде             | 2088425,2           | 1869269574               |
|                    | Вахдат                 | 2066889,2           | 1885516372               |
| Варзоб             | 1087734                | 999419264           |                          |
|                    | Душанбе                | 3271841,2           | 3028848148               |
| ГБАО               | Ишкашим                | 13784               | 12203670,58              |
|                    | Мургаб                 | 11346,4             | 11770356,28              |
|                    | Рошткала               | 67083,6             | 59329586,91              |
|                    | Рушан                  | 17395,2             | 14999552,22              |
|                    | Шугнан                 | 142088,4            | 124982932,3              |
|                    | Ванч                   | 16360               | 12867405,93              |
| Хатлонская область | Балджувон              | 149308,8            | 133660034,9              |
|                    | Кушониён               | 2380548,4           | 2058418604               |
|                    | Дангара                | 1168123,2           | 1053930006               |
|                    | Фархор                 | 1217414,4           | 1083020775               |
|                    | Дусти                  | 14757,6             | 14398149,23              |
|                    | Джоми                  | 1283596,8           | 1156653103               |
|                    | Ховалинг               | 341228              | 311100331,6              |
|                    | Хуросон                | 1132280             | 997769528,4              |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 95750               | 79570547,55              |
|                    | Муминобод              | 12948               | 11334694,05              |
| Нурек              | 457513,2               | 428286096,1         |                          |

| Область            | Район или город  | Общая мощность, кВт | Годовая генерация, кВт·ч |
|--------------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| Хатлонская область | Носири Хусрав    | 385940              | 326810659,4              |
|                    | Пяндж            | 781150              | 659366036,9              |
|                    | Кабодиён         | 604937,2            | 523197959,4              |
|                    | Джайхун          | 437057,6            | 404102581                |
|                    | Леваконт         | 350340,8            | 290791893,9              |
|                    | Шахритус         | 1328050,4           | 1198566706               |
|                    | Темурмалик       | 538182,4            | 497319373,2              |
|                    | Вахш             | 401537,2            | 362985859,1              |
|                    | Восеъ            | 602682,8            | 536929715,3              |
|                    | Яван             | 1593854             | 1500635456               |
| Согдийская область | Ашт              | 1466090,8           | 1219845249               |
|                    | Айни             | 510298,8            | 475442925,4              |
|                    | Бободжон Гафуров | 5271044,4           | 4317810489               |
|                    | Деваштич         | 527125,6            | 455828227,1              |
|                    | Исфара           | 2465694,8           | 1969197918               |
|                    | Истаравшан       | 1023618             | 916833260,5              |
|                    | Джаббор Расулов  | 1275301,6           | 1077220273               |
|                    | Канибадам        | 2094980,4           | 1680493009               |
|                    | Горная Матча     | 58472,8             | 49606667,13              |
|                    | Матча            | 1144160,8           | 1023031720               |
|                    | Пенджикент       | 2287396,8           | 2295633829               |
|                    | Шахристон        | 378140,8            | 352606374,7              |
|                    | Спитамен         | 1336583,2           | 1168866174               |
|                    | Зафарабад        | 206279,6            | 179631197,8              |
| Итого              |                  | 53974014,8          | 47850812411              |

Соответствующие значения годовой генерации также демонстрируют концентрацию потенциала в данных локациях. Например, в Бободжон Гафурове годовая выработка превышает 4,31 млрд кВт·ч, в Рудаки – 3,23 млрд кВт·ч, в Душанбе – 3,03 млрд кВт·ч, а в Исфаре – 1,97 млрд кВт·ч. Для сравнения, отдельные горные районы ГБАО (Ишкашим, Мургаб, Рошткала, Ванч) обладают относительно небольшими значениями установленной мощности (в диапазоне 0,01–0,07 ГВт), что связано с низкой плотностью зданий. Тем не менее даже в таких условиях годовая генерация сохраняет

значимость для автономного или гибридного энергоснабжения малых населённых пунктов.

Особо следует отметить, что значения ориентационного коэффициента находятся в диапазоне от 0,60 до 0,64, что свидетельствует о преобладании геометрии зданий, частично приближенной к оптимальной южной ориентации. Это повышает достоверность оценки без необходимости использования 3D-моделей.

Важным аспектом оценки является выявление зависимости между значением солнечного ресурса (PVOUT) и удельной годовой генерацией (в кВт·ч/м<sup>2</sup>). На рисунке 3.1 представлена эта корреляция с отчётливо выраженным положительным трендом. Повышение PVOUT на 100 кВт·ч/кВт сопровождается ростом удельной генерации на ~8–10 кВт·ч/м<sup>2</sup>, при условии постоянства других факторов.

Такое поведение подтверждает, что даже при отсутствии лидар и цифровых моделей зданий, комбинация PVOUT и геометрической аппроксимации может обеспечить реалистичную оценку генерационного потенциала.

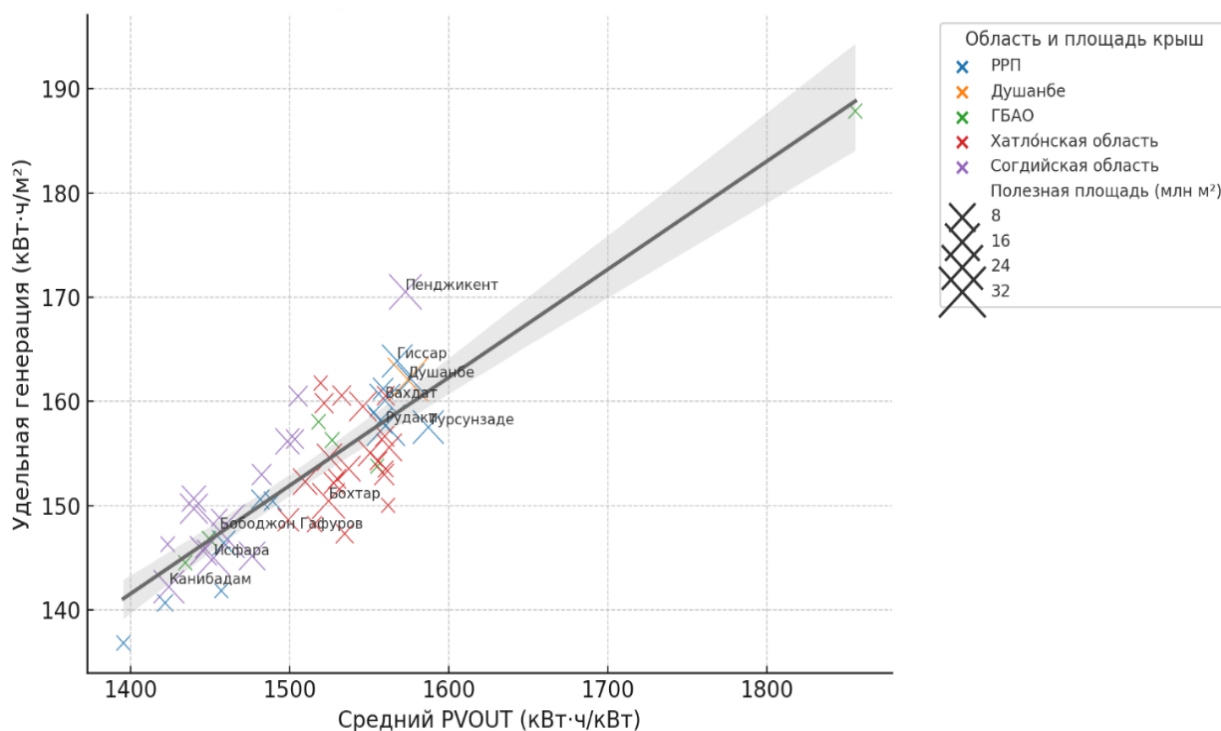


Рисунок 3.1. – Зависимость удельной генерации от среднего PVOUT

Для иллюстрации внутригородской вариативности технического потенциала были построены карты распределения установленной мощности крышных ФЭС на уровне зданий для четырёх ключевых городов страны (Рис. 3.2). В столице, г. Душанбе высокая плотность зданий в центральной части города сочетается с преобладанием крыш с мощностью 100–215 кВт.

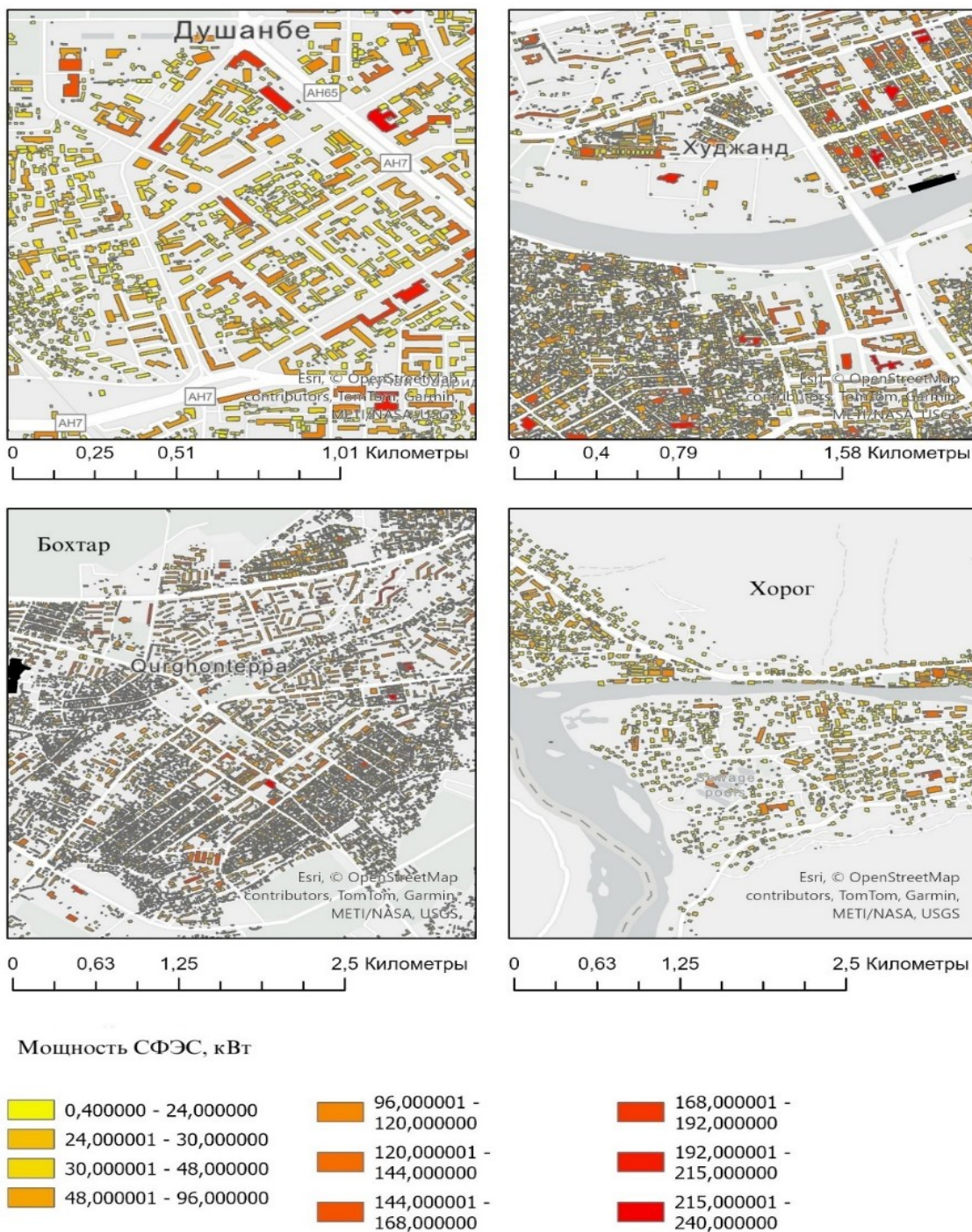


Рисунок 3.2. – Пространственное распределение установленной мощности крышных СФЭС на уровне зданий в четырёх городах Таджикистана

Душанбе, Худжанд, Бохтар, Хорог. Цвет отражает диапазон суммарной мощности на здание (в кВт), рассчитанной на основе полезной площади крыши, коэффициента ориентации и радиационного ресурса PVOUT.

В г. Бохтар зафиксировано значительное число объектов с установленной мощностью >144 кВт, преимущественно в южной и восточной частях города. В то же время, в г. Хорог, несмотря на малую плотность застройки, присутствуют отдельные здания с высокой плотностью СФЭС (до 192 кВт), что объясняется благоприятной ориентацией и отсутствием затенения.

Проведённый анализ выявил выраженную зависимость между среднегодовым солнечным ресурсом (PVOUT) и энергетической эффективностью крыш зданий, проявляющуюся в удельной годовой генерации на единицу полезной площади. Используемый показатель удельной генерации рассчитывался по формуле:

$$G_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{год}}}{S_{\text{полезн}}} \quad (3.1)$$

где  $E_{\text{год}}$  – годовая генерация энергии, а  $S_{\text{полезн}}$  – площадь крыши, пригодная для установки фотоэлектрических панелей. Расчёты показали наличие сильной положительной линейной корреляции между средним PVOUT и  $G_{\text{уд}}$ , при этом, коэффициент корреляции составил  $r=0,87$ , а коэффициент детерминации  $R^2=0,75$ , что свидетельствует о высокой объясняющей способности солнечного ресурса по отношению к фактической продуктивности СФЭС.

Дополнительные ограничения связаны с качеством исходных пространственных данных: в отсутствие лидар и трёхмерной информации, полезная площадь оценивалась на основе векторных контуров из Microsoft Building Footprints, с учётом ограничений по затенению и ориентации на базе алгоритма главных компонент. Несмотря на это, пространственная модель показала высокую воспроизводимость, и позволяет ранжировать регионы по эффективности использования крыши под солнечную генерацию.

С практической точки зрения, выявленная зависимость обосновывает использование PVOUT в качестве основного критерия при предварительной оценке зон приоритетного развития распределённой солнечной генерации, особенно в условиях дефицита точных геометрических данных. Предлагаемый метод позволяет не только создать шкалу энергоэффективности крыш, но и обосновать стратегии субсидирования, зонирования и интеграции муниципальных и частных солнечных установок в общую энергосистему. Таким образом, разработанный подход может быть успешно адаптирован как на национальном уровне, так и в рамках трансграничных инициатив, направленных на декарбонизацию энергетического сектора Центральной Азии и укрепление энергетической безопасности при минимальных затратах инфраструктурного характера.

### **3.2. Детализированная оценка потенциала для города Душанбе**

Методология данной статьи имеет целью определения более точной оценки потенциала солнечной энергии на крышах города Душанбе и охватывает следующие показатели:

**Оценка валового потенциала.** Методология начинается с оценки физического потенциала путем измерения максимально доступной солнечной энергии. Используются метеорологические данные, включая месячную радиацию и индекс ясности, полученные либо с наземных метеорологических станций, либо через спутниковые наблюдения. Предпочтение отдается спутниковым данным за их лучшее пространственное покрытие и низкий процент пропущенных данных. Оценка проводится с использованием различных солнечных моделей для расчета необходимых данных.

**Оценка географического потенциала.** В этой фазе анализируется влияние застроенной среды на доступность солнечного света, исключая зоны, не подходящие для установки фотоэлектрических панелей. Оценка включает в себя рассмотрение геометрии крыши, влияние затенения от соседних зданий и деревьев, а также другие аспекты, такие как надстройки и уклон крыши.

Данные могут быть собраны из различных источников, включая кадастровые данные, данные лидар и ГИС-анализы.

**Оценка технического потенциала.** Затем определяется максимальное производство электроэнергии на основе валового и географического потенциалов и технических характеристик солнечных панелей. Рассматриваются такие факторы, как эффективность панелей, производительность и коэффициенты потерь, которые могут возникать из-за условий окружающей среды и технических ограничений. Анализ также включает в себя стратегии управления энергопотреблением для оптимизации работы системы.

При оценке целесообразности использования фотоэлектрических панелей на строительных конструкциях, например, крышах, следует учитывать следующие основные принципы:

- Оценка общей площади, доступной на крышах зданий.
- Расчёт общей площади, подходящей для установки фотоэлектрических панелей на крыше.
- Оценка солнечной радиации, приходящей на крышу зданий.
- Расчет выработки электроэнергии встроенными солнечными панелями на крыше.
- Определение соответствующих инвестиционных затрат.

Технологии пространственной информации, в частности географические информационные системы (ГИС), часто используются для оценки осуществимости строительства солнечных электростанций и определения подходящих мест для них. ГИС - это мощный инструмент пространственного анализа, который объединяет географические данные для оценки технического и экономического потенциала солнечной энергетики. Интегрируя подход, основанный на ГИС, с моделированием энергетических систем, становится возможным проанализировать жизнеспособность

солнечных фотоэлектрических систем на крышах как с точки зрения географического, так и технического потенциала.

Данное исследование сосредоточено на оценке потенциала использования солнечной энергии для различных типов зданий в Душанбе, включая жилые, промышленные, социальные, деловые здания и здания другого назначения. Следует отметить, что в рамках данной работы не рассматривались дома барачного типа и малоэтажные частные домовладения, большинство которых подлежат сносу в среднесрочной перспективе. Оценка основана на пошаговой процедуре, которая включает в себя разделение и классификацию географических данных, расчет общей площади, анализ ориентации крыши с использованием метода выборки и анализ теней и препятствий на крыше. При оценке также учитывается фактор использования доступной площади крыши. Географический потенциал для установки солнечных фотоэлектрических систем определяется как полезная площадь крыши, на которую поступает солнечное излучение. Чтобы довести общую площадь поверхности до фактической полезной площади, производятся абсолютные и относительные сокращения. Абсолютные уменьшения применяются к площади, которая должна быть вычтена непосредственно из площади поверхности, в то время как относительные уменьшения применяются из-за ориентации, теней и препятствий. Для каждой строительной площадки присваивается индивидуальный код, и инструмент "Расчитать геометрию" в программном обеспечении ArcGIS используется для расчета ее базовой площади. Этот инструмент обеспечивает легкий доступ к геометрии объектов в слое на основе значений координат и длин.

Важное значение для установки солнечных фотоэлектрических систем имеет оценка технического потенциала. Для плоских крыш рассчитывается расстояние между рядами солнечных панелей и углы их наклона. На скатных крышах предполагается, что солнечные фотоэлектрические модули должны быть параллельны плоскости крыши. Для солнечных фотоэлектрических модулей на плоских крышах с различной ориентацией используется угол

наклона  $30^\circ$ . Этот угол обеспечивает оптимальную выработку электроэнергии в условиях города Душанбе. Различная ориентация может привести к различной выработке электроэнергии. Для расчета выработки электроэнергии солнечными фотоэлектрическими установками учитываются три основных параметра: солнечное излучение местности, размер солнечной фотоэлектрической системы и эффективность системы. Для выполнения этих вычислений используется программное обеспечение PVsyst (версия 6.87). Измерение площади крыш зданий были проведены с помощью программного обеспечения Arcgis (Рис.3.3), результаты приведены в таблице 3.3-3.4.

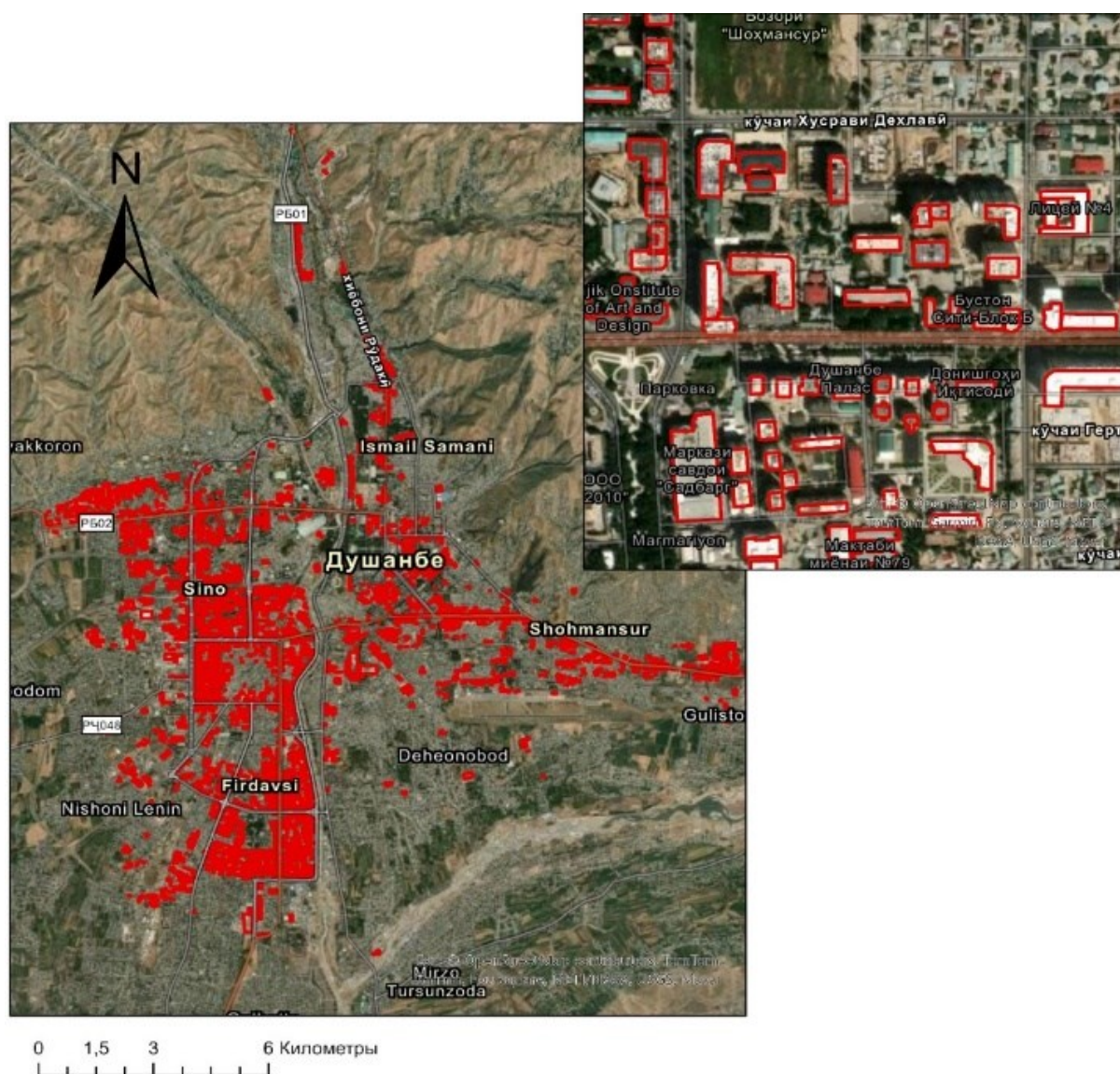


Рисунок 3.3. – Спутниковые снимки из Google Earth Pro с отображением границ участка, определённых в ArcGIS Pro (красные линии указывают площадь застройки)

Таблица 3.3. – Статистика потенциала размещения ФЭС на крышах в Душанбе

| Тип здания                  | Количество зданий | Базовая площадь (км <sup>2</sup> ) | Пригодная площадь (км <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Офисные здания              | 42                | 0,032                              | 0,026                                |
| Новые жилые здания          | 1104              | 0,832                              | 0,665                                |
| Больницы                    | 38                | 0,053                              | 0,042                                |
| Детские сады                | 79                | 0,076                              | 0,061                                |
| Школы                       | 217               | 0,244                              | 0,195                                |
| Старые жилые дома без лифта | 1299              | 1,006                              | 0,604                                |
| Старые жилые дома с лифтом  | 351               | 0,118                              | 0,083                                |
| Гостиницы                   | 13                | 0,020                              | 0,016                                |
| Государственные учреждения  | 107               | 0,138                              | 0,111                                |
| Университеты                | 130               | 0,158                              | 0,126                                |
| Промышленные объекты        | 284               | 1,000                              | 0,800                                |
| Торговые центры             | 20                | 0,049                              | 0,039                                |
| Рестораны                   | 13                | 0,013                              | 0,011                                |
| АЗС                         | 15                | 0,006                              | 0,005                                |
| Автопарки, вокзалы, такси   | 77                | 0,130                              | 0,078                                |
| Спортивные комплексы        | 3                 | 0,004                              | 0,003                                |
| Неизвестно                  | 7                 | 0,036                              | 0,029                                |
| Рынки                       | 81                | 0,354                              | 0,213                                |
| Итого                       | 3880              | 4,269                              | 3,105                                |

Таблица 3.4. – 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  |

Было установлено, что площадь крыш, подходящая для монтажа солнечных фотоэлектрических панелей, составляет 3,1 км<sup>2</sup> [4-А, 7-А]. Солнечный потенциал, представленный в Таблице 3.4, обусловлен размещением ФЭС на всех доступных крышах зданий. Помимо этого, изучен технический потенциал, отражающий прогнозируемые объёмы генерации солнечной энергии в сочетании с географическим потенциалом, при учёте технических характеристик системы. Прогнозируемая выработка электроэнергии, определяемая рациональным использованием площади крыш, учитывает такие факторы проектирования, как расстояние между рядами ФЭ-панелей и особенности самих панелей. Согласно полученным данным, для установки мощностью 1 кВт требуется 5 м<sup>2</sup> на скатной крыше и 10 м<sup>2</sup> на плоской (Рис.3.4).

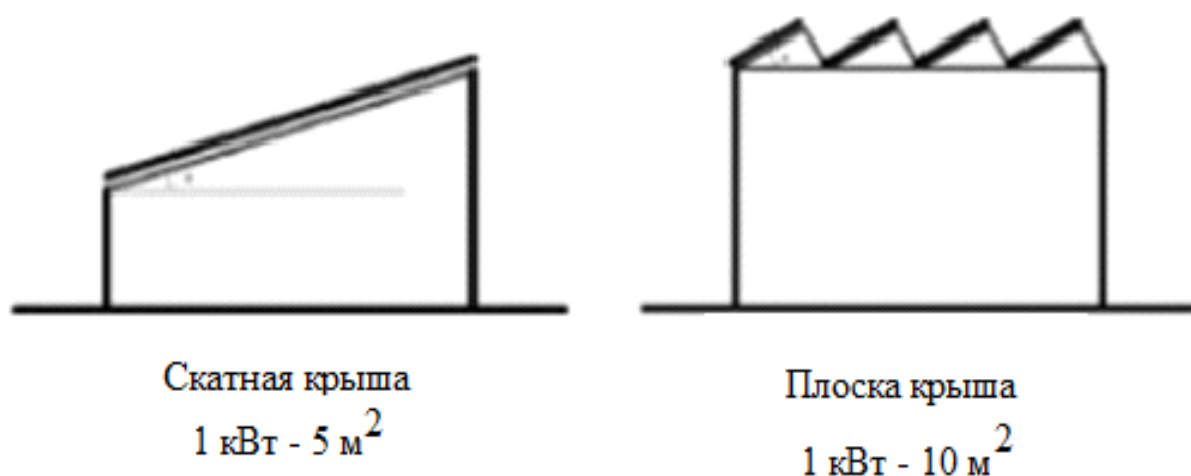


Рисунок 3.4. – Схема расположения фотоэлектрических панелей в зависимости от типа крыши

В условиях города Душанбе максимальная удельная выработка, равная 1443 кВт·ч/кВт<sub>р</sub> в год, достигается при установке панелей под углом 30 градусов, ориентированных на юг; при других ориентациях и углах наклона это значение уменьшается (Рис.3.5).

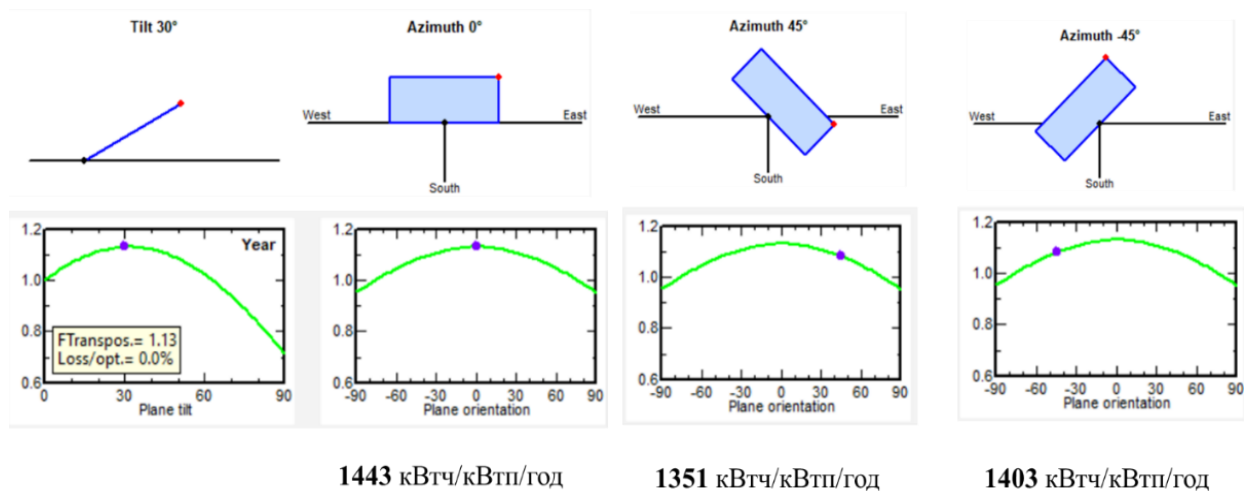


Рисунок 3.5. – Выработка электроэнергии фотоэлектрическими панелями в зависимости от ориентации панелей при угле наклона 30 градусов

Доступная площадь крыш обеспечивает суммарную мощность 310 МВт, что позволяет ежегодно вырабатывать 447 ГВт·ч электроэнергии при общем потреблении города в 3,2 млрд кВт·ч в 2023 году.

Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал использования солнечной энергии на крышах зданий в Душанбе. Общая площадь крыш, пригодных для установки солнечных панелей, составляет 3,1 км<sup>2</sup>. В работе проводится анализ технического потенциала, позволяющего прогнозировать объём электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими системами, с учётом географических особенностей и технических характеристик оборудования. Прогнозируемая выработка электроэнергии рассчитывается на основе рационального использования крыш, принимая во внимание проектные параметры, такие как расстояние между рядами солнечных панелей и их технические спецификации. Пригодная площадь крыш обеспечивает суммарную мощность около 310 МВт, а ожидаемый годовой объём вырабатываемой электроэнергии составляет 447 ГВт·ч, что

соответствует примерно 14% от общего потребления электроэнергии города (3,2 млрд кВт·ч в 2023 году).

### 3.3. Оценка экономической эффективности и анализ чувствительности к изменению тарифов и капитальных затрат

В результате пространственно-экономического анализа Таджикистана, было отобрано 3 664 104 здания, соответствующих критериям пригодности по площади  $>20\text{м}^2$ . (Рис.3.6).

Совокупная установленная мощность составила 53,97 ГВт, а расчётная годовая генерация достигла 47,85 млрд кВт·ч, что в два раза превышает текущее годовое электропотребление республики (порядка 20 млрд кВт·ч). Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительного снижения нагрузки на централизованную энергосистему и повышения устойчивости энергоснабжения в регионах страны. Таким образом, внедрение руртоп солнечных установок может рассматриваться как один из ключевых факторов долгосрочной диверсификации топливно-энергетического баланса Республики Таджикистан.

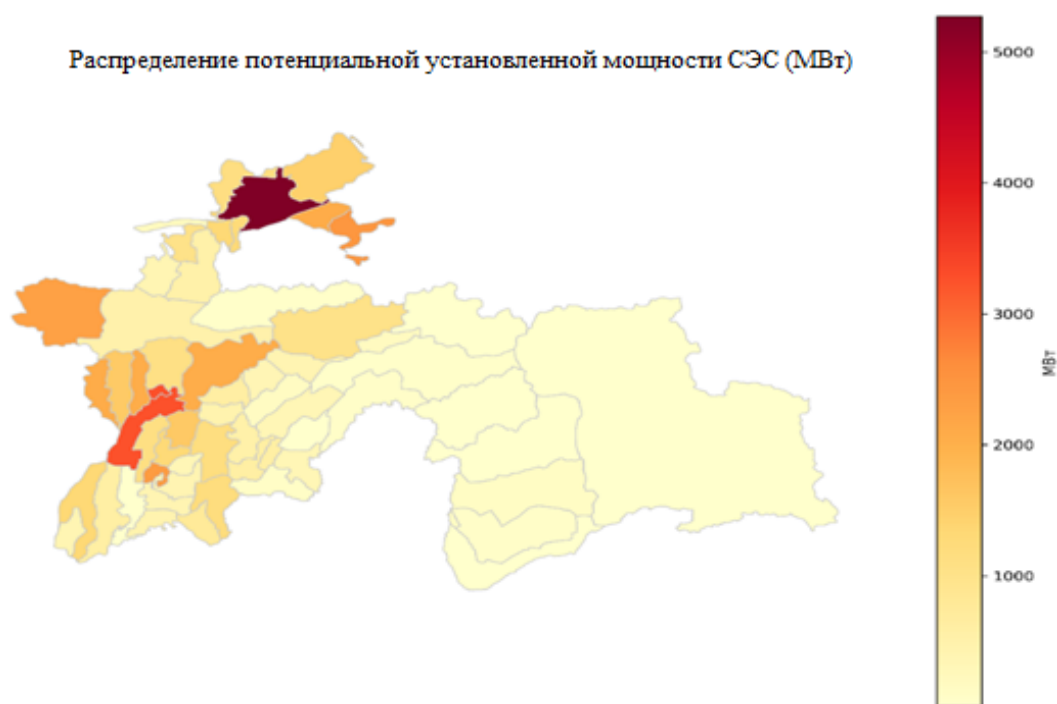


Рисунок 3.6. – Пространственное распределение потенциальной установленной мощности (МВт) по районам

Средние значения ПСЭ по районам варьируются от 0,032 до 0,042 долларов США/кВт·ч, что сопоставимо с действующим тарифом на электроэнергию в Таджикистане (0,032 долларов США/кВт·ч) или превышает его на более 30 %.

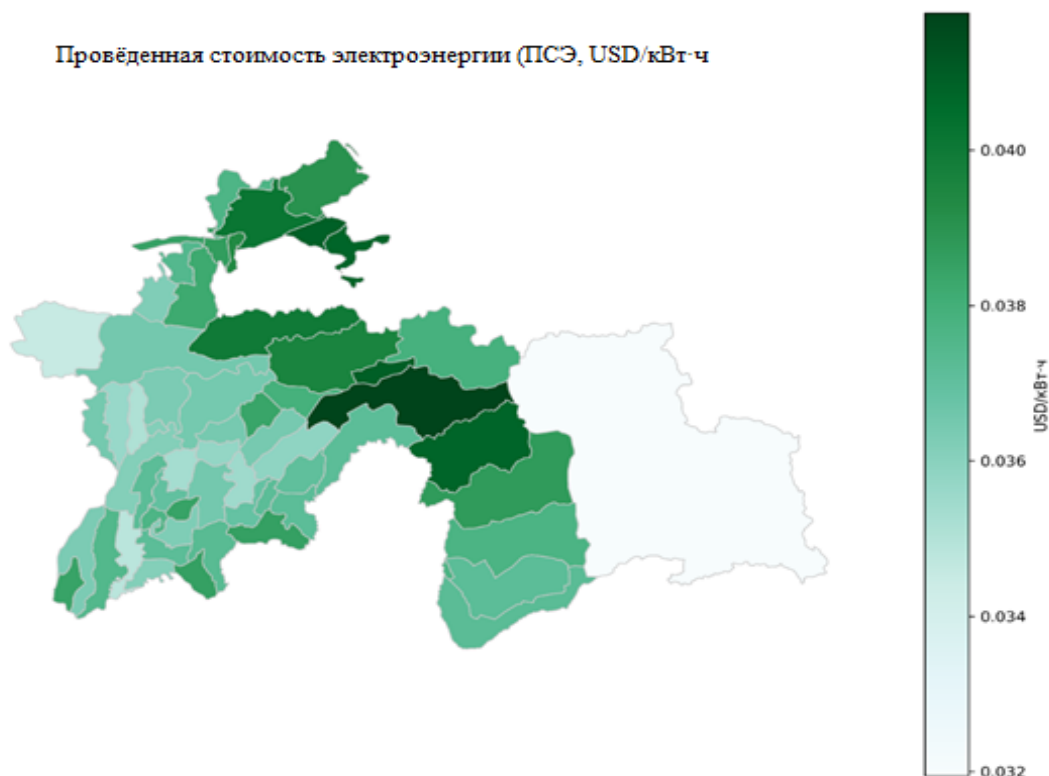


Рисунок 3.7. – Картограмма средних значений ПСЭ по административным районам

Разброс ПСЭ между районами составляет  $\Delta\text{ПСЭ} \approx 0,010$  долларов США/кВт·ч, что в первую очередь обусловлено географическими различиями в PVOUT и ориентацией кровельных поверхностей (Рис.3.7).

Проведённый анализ показывает, что даже в наиболее благоприятных административных районах реализация крышных ФЭС остаётся экономически нецелесообразной при отсутствии внешней финансовой поддержки. Максимальный тарифный разрыв – разность между расчётной ПСЭ и действующим тарифом на электроэнергию для населения (0,032 долларов США/кВт·ч) – достигает 0,016 долларов США/кВт·ч, что указывает на необходимость внедрения субсидий, инвестиционных стимулов и/или реформирования тарифной политики.

Расчётный срок окупаемости в базовом сценарии превышает 80 лет по всем административным районам, а в ряде случаев стремится к бесконечности, что обусловлено отрицательной чистой приведённой стоимостью (ЧПС <0) в течение 25-летнего эксплуатационного цикла. Ни один из районов не демонстрирует окупаемости  $\leq 12$  лет – предельного значения, которое обычно рассматривается как ориентир инвестиционной привлекательности в странах с развивающейся экономикой.

Полученные результаты свидетельствуют о крайне низкой экономической эффективности крышных ФЭС в текущих условиях, несмотря на наличие значительного технического потенциала и благоприятных климатических характеристик в отдельных регионах. Отрицательные значения ЧПС во всех районах в базовом сценарии обусловлены одновременно высокими капитальными затратами и заниженными конечными тарифами на электроэнергию.

В сценарии, предусматривающем снижение капитальных затрат на 20 % – за счёт локализации производства, предоставления налоговых льгот или инвестиционных субсидий – среднее значение ПСЭ снижается до 0,029–0,038 долларов США/кВт·ч. Однако даже при таких параметрах ни один район не достигает положительного значения ЧПС, что подчёркивает необходимость комплексной и многоуровневой поддержки со стороны государства и международных партнёров.

Альтернативный сценарий, предполагающий повышение тарифа до 0,045 долларов США/кВт·ч, демонстрирует значительно более благоприятный результат: 83,6 % объектов становятся рентабельными, что подчёркивает ключевую роль тарифной политики как инструмента стимулирования децентрализованной генерации.

Особое значение при этом приобретает внедрение механизма фиксированной выкупной ставки, или так называемого «зелёного тарифа», успешно применяемого в ряде стран с формирующимся рынком ВИЭ. Данный инструмент представляет собой долгосрочные обязательства государства по

гарантированному выкупу электроэнергии, произведённой из возобновляемых источников, по фиксированной ставке, что позволяет обеспечить возврат инвестиций, снизить финансовые риски и повысить привлекательность проектов для частных инвесторов.

В условиях Таджикистана, где текущий тариф не обеспечивает окупаемости даже при оптимистичных сценариях снижения затрат, введение поэтапного «зелёного тарифа» с региональной дифференциацией и предсказуемым горизонтом действия может служить краеугольным элементом политики поддержки сектора распределённой солнечной энергетики.

Высокая чувствительность результатов к изменениям экономических параметров подчёркивает необходимость внедрения гибких механизмов поддержки, включая прогрессивные тарифные схемы, субсидирование капитальных затрат и грантовое финансирование. Расчёты показывают, что среднее значение годовой субсидии, необходимой для компенсации тарифного разрыва, составляет от 41 до 187 долларов США на здание в зависимости от применяемого сценария. При охвате всей выборки (более 3,6 млн объектов) совокупная потребность в субсидировании на 25-летнем горизонте составляет от 8,7 до 11,6 млрд долларов США.

Наиболее эффективными с точки зрения соотношения объёма генерации и объёма необходимой поддержки являются районы Фархор, Шахритус, Джалолиддин Балхи, а также города Душанбе, Худжанд и Бохтар, которые могут быть рекомендованы в качестве пилотных территорий для поэтапного внедрения программ с государственным субсидированием поддержкой донорских структур. Сравнение с международными исследованиями показывает, что расчётные значения ПСЭ в Таджикистане (0,029–0,042 долларов США/кВт·ч) сопоставимы с аналогичными проектами в странах с высокой солнечной инсоляцией и ограниченной сетевой инфраструктурой. Однако, в отличие от этих стран, в Таджикистане отсутствуют устойчивые механизмы финансовой поддержки, включая тарифные гарантии, систем взаиморасчетов за электроэнергию или выкуп её по фиксированной цене, что

существенно снижает инвестиционную привлекательность даже при наличии благоприятных технических условий.

Таблица 3.5 содержит систематизированные результаты сравнения ПСЭ с величинами предложенных «зелёных» тарифов для двух сценариев: базового и сценария со сниженными капитальными затратами. Эти данные позволяют оценить экономическую сбалансированность механизмов поддержки крышных ФЭС в территориальном разрезе, а также определить зоны, в которых стимулирующие тарифы могут обеспечить ускоренное масштабирование солнечной генерации.

Таблица 3.5. – Сравнение значений ПСЭ и «зелёного» тарифа по сценариям (базовый уровень / сниженный уровень)

| Область | Район или город | ПСЭ в базовом сценарии | ПСЭ в низком (со снижением капитальных затрат) сценарии | «Зелёный» тариф – базовый уровень | «Зелёный» тариф – сниженный уровень |
|---------|-----------------|------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| РРП     | Файзабад        | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Гиссар          | 0,035                  | 0,032   | 0,040                             | 0,037                               |
|         | Лахш            | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,040                               |
|         | Нуробод         | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,040                               |
|         | Рашт            | 0,040                  | 0,036   | 0,046                             | 0,042                               |
|         | Рогун           | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,040                               |
|         | Рудаки          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Шахринав        | 0,036                  | 0,033   | 0,041                             | 0,038                               |
|         | Сангвор         | 0,042                  | 0,038   | 0,048                             | 0,044                               |
|         | Таджикабад      | 0,041                  | 0,038   | 0,047                             | 0,043                               |
|         | Турсунзаде      | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Вахдат          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Варзоб          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Рудаки          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Шахринав        | 0,036                  | 0,033   | 0,041                             | 0,038                               |
|         | Сангвор         | 0,042                  | 0,038   | 0,048                             | 0,044                               |
|         | Таджикабад      | 0,041                  | 0,038   | 0,047                             | 0,043                               |
|         | Турсунзаде      | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Вахдат          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Варзоб          | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|         | Душанбе         | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |

| Область            | Район или город        | ПСЭ в базовом сценарии | ПСЭ в низком (со снижением капитальных затрат) сценарии | «Зелёный» тариф – базовый уровень | «Зелёный» тариф – сниженный уровень |
|--------------------|------------------------|------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| ГБАО               | Ишкашим                | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Мургаб                 | 0,032                  | 0,029   | 0,037                             | 0,034                               |
|                    | Рошткала               | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Рушан                  | 0,039                  | 0,036   | 0,045                             | 0,041                               |
|                    | Шугнан                 | 0,038                  | 0,035   | 0,043                             | 0,040                               |
|                    | Ванч                   | 0,041                  | 0,037   | 0,047                             | 0,043                               |
| Хатлонская область | Балджувон              | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|                    | Кушониён               | 0,038                  | 0,035   | 0,043                             | 0,040                               |
|                    | Дангара                | 0,037                  | 0,033   | 0,042                             | 0,039                               |
|                    | Фархор                 | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Дусти                  | 0,035                  | 0,032   | 0,040                             | 0,037                               |
|                    | Джоми                  | 0,037                  | 0,034   | 0,042                             | 0,039                               |
|                    | Ховалинг               | 0,036                  | 0,033   | 0,041                             | 0,038                               |
|                    | Хуросон                | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 0,039                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
|                    | Муминобод              | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Нурек                  | 0,036                  | 0,033   | 0,041                             | 0,038                               |
|                    | Носири Хусрав          | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
|                    | Пяндж                  | 0,039                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
|                    | Кабодиён               | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,040                               |
|                    | Джайхун                | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|                    | Леваканд               | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
|                    | Шахритус               | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|                    | Темурмалик             | 0,035                  | 0,033   | 0,041                             | 0,037                               |
|                    | Вахш                   | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
| Восеъ              | 0,037                  | 0,034                  | 0,042   | 0,039                             |                                     |
| Яван               | 0,035                  | 0,032                  | 0,041   | 0,037                             |                                     |
| Согдийская область | Ашт                    | 0,039                  | 0,036   | 0,045                             | 0,041                               |
|                    | Айни                   | 0,037                  | 0,033   | 0,042                             | 0,039                               |
|                    | Бободжон Гафуров       | 0,040                  | 0,037   | 0,046                             | 0,042                               |
|                    | Деваштич               | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,040                               |
|                    | Исфара                 | 0,041                  | 0,037   | 0,047                             | 0,043                               |
|                    | Истаравшан             | 0,037                  | 0,034   | 0,043                             | 0,039                               |
|                    | Джаббор Расулов        | 0,039                  | 0,036   | 0,045                             | 0,041                               |

продолжение таблицы 3.5

| Область            | Район или город | ПСЭ в базовом сценарии | ПСЭ в низком (со снижением капитальных затрат) сценарии | «Зелёный» тариф – базовый уровень | «Зелёный» тариф – сниженный уровень |
|--------------------|-----------------|------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Согдийская область | Канибадам       | 0,041                  | 0,037   | 0,047                             | 0,043                               |
|                    | Горная Матча    | 0,040                  | 0,037   | 0,046                             | 0,042                               |
|                    | Матча           | 0,038                  | 0,034   | 0,043                             | 0,040                               |
|                    | Иенджикент      | 0,035                  | 0,032   | 0,040                             | 0,036                               |
|                    | Шахристон       | 0,036                  | 0,033   | 0,042                             | 0,038                               |
|                    | Спитамен        | 0,039                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
|                    | Зафарабад       | 0,038                  | 0,035   | 0,044                             | 0,041                               |
| Среднее            |                 | 0,039                  | 0,036   | 0,045                             | 0,041                               |

В подавляющем большинстве районов Республики Таджикистан значения ПСЭ в базовом сценарии лежат в интервале 0,035–0,040 долларов США/кВт·ч, что соответствует структуре затрат типовых крышных установок, рассчитанных для условий страны. Снижение капитальных затрат (–20%) приводит к пропорциональному уменьшению показателя ПСЭ на 0,003–0,004 долларов США/кВт·ч, что делает солнечную генерацию ещё более конкурентоспособной на фоне действующих тарифов для конечных потребителей.

Значения «зелёного» тарифа, рассчитанные как экономически обоснованные ориентиры для стимулирования сектора крышных ФЭС, во всех районах находятся выше ПСЭ – в среднем на 0,004–0,006 долларов США/кВт·ч, что формирует положительную разницу, необходимую для компенсации рисков, обеспечению возврата инвестиций и привлечению частного капитала. В районах с более высокой себестоимостью (Сангвор, Таджикабад, Исфара, Канибадам) величины «зелёного» тарифа достигают 0,046–0,048 долларов США/кВт·ч, что отражает влияние удалённости, ограниченного объёма солнечного ресурса, повышенных логистических расходов и инфраструктурных ограничений.

Таблица 3.6 содержит результаты расчёта тарифного разрыва – разницы между величинами «зелёного» тарифа и ПСЭ выраженной в долларов США/кВт·ч для двух сценариев: базового и со сниженными капитальными затратами. Полученные показатели позволяют оценить, в какой степени действующие или предлагаемые тарифные механизмы способны обеспечить экономическую привлекательность крышных ФЭС при различиях региональных условий.

Таблица 3.6.– Сравнение тарифного разрыва по сценариям (базовый уровень / сниженный уровень)

| Область            | Район или город | Тарифный разрыв (базовый сценарий) | Тарифный разрыв (сниженный сценарий) |
|--------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| РРП                | Файзабад        | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Гиссар          | 0,008                              | 0,005                                |
|                    | Лахш            | 0,012                              | 0,008                                |
|                    | Нуробод         | 0,012                              | 0,008                                |
|                    | Рашт            | 0,014                              | 0,010                                |
|                    | Рогун           | 0,012                              | 0,008                                |
|                    | Рудаки          | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Шахринав        | 0,009                              | 0,006                                |
|                    | Сангвор         | 0,016                              | 0,012                                |
|                    | Таджикабад      | 0,015                              | 0,011                                |
|                    | Турсунзаде      | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Вахдат          | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Варзоб          | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Душанбе         | 0,010                              | 0,006                                |
| ГБАО               | Ишкашим         | 0,011                              | 0,007                                |
|                    | Мургаб          | 0,005                              | 0,002                                |
|                    | Рошткала        | 0,011                              | 0,007                                |
|                    | Рушан           | 0,013                              | 0,009                                |
|                    | Шугнан          | 0,011                              | 0,008                                |
|                    | Ванч            | 0,015                              | 0,011                                |
| Хатлонская область | Балджувон       | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Кушониён        | 0,011                              | 0,008                                |
|                    | Дангара         | 0,010                              | 0,007                                |
|                    | Фархор          | 0,011                              | 0,007                                |

| Область            | Район или город        | Тарифный разрыв (базовый сценарий) | Тарифный разрыв (сниженный сценарий) |
|--------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Хатлонская область | Дусти                  | 0,008                              | 0,005                                |
|                    | Джоми                  | 0,010                              | 0,007                                |
|                    | Ховалинг               | 0,009                              | 0,006                                |
|                    | Хуросон                | 0,011                              | 0,007                                |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 0,012                              | 0,009                                |
|                    | Муминобод              | 0,011                              | 0,007                                |
|                    | Нурек                  | 0,009                              | 0,006                                |
|                    | Носири Хусрав          | 0,012                              | 0,009                                |
|                    | Пяндж                  | 0,012                              | 0,009                                |
|                    | Кабодиён               | 0,011                              | 0,008                                |
|                    | Джайхун                | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Леваканд               | 0,012                              | 0,009                                |
|                    | Шахритус               | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Темурмалик             | 0,009                              | 0,005                                |
|                    | Вахш                   | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Восеъ                  | 0,010                              | 0,007                                |
|                    | Яван                   | 0,009                              | 0,005                                |
| Согдийская область | Ашт                    | 0,013                              | 0,009                                |
|                    | Айни                   | 0,010                              | 0,007                                |
|                    | Бободжон Гафуров       | 0,014                              | 0,010                                |
|                    | Деваштич               | 0,012                              | 0,008                                |
|                    | Исфара                 | 0,015                              | 0,011                                |
|                    | Истаравшан             | 0,011                              | 0,007                                |
|                    | Джаббор Расулов        | 0,013                              | 0,009                                |
|                    | Канибадам              | 0,015                              | 0,011                                |
|                    | Горная Матча           | 0,014                              | 0,010                                |
|                    | Матча                  | 0,011                              | 0,008                                |
|                    | Пенджикент             | 0,008                              | 0,004                                |
|                    | Шахристон              | 0,010                              | 0,006                                |
|                    | Спитамен               | 0,012                              | 0,009                                |
|                    | Зафарабад              | 0,012                              | 0,009                                |

Анализ данных демонстрирует значимую территориальную вариативность величины тарифного разрыва. В районах РРП и городе

Душанбе тарифный разрыв в базовом сценарии составляет преимущественно 0,0090–0,0135 долларов США/кВт·ч, а в сниженном – 0,0050–0,0097 долларов США/кВт·ч. Эти значения относятся к наименьшим по стране и указывают на высокую экономическую готовность центральных регионов к внедрению крышных солнечных систем. Особенно низкие значения характерны для Гисара, Рудаки, Шахринава, Варзоба и Душанбе, где сниженный тарифный разрыв составляет 0,0050–0,0063 долларов США /кВт·ч, что приближает себестоимость солнечной генерации к уровню сетевого паритета.

В то же время в отдалённых и горных районах, таких как Сангвор, Таджикабад и ряд районов Согдийской области (Канибадам, Исфара, Бободжон Гафуров), тарифный разрыв значительно выше. В базовом сценарии он достигает 0,014–0,016 долларов США/кВт·ч, а в сниженном – 0,010–0,012 долларов США/кВт·ч. Это указывает на необходимость дополнительных мер стимулирования субсидий на капитальные затраты, льготного финансирования и регионально дифференцированных тарифов для обеспечения окупаемости проектов в данных территориях.

Особый интерес представляют районы, в которых солнечные установки демонстрируют исключительно низкую себестоимость электроэнергии. Например, Мургаб характеризуется минимальным тарифным разрывом в стране: 0,0047 долларов США/кВт·ч в базовом и всего 0,0017 долларов США/кВт·ч в сниженном сценарии. Это обусловлено высоким уровнем солнечного ресурса, что значительно снижает ПСЭ. Аналогичная, хотя и менее выраженная динамика наблюдается в Пяндже, Дусти и Пенджикенте, где сниженный тарифный разрыв находится на уровне 0,004-0,005 долларов США /кВт·ч, обеспечивая высокую рентабельность даже при минимальной тарифной поддержке.

В Хатлонской области большинство районов демонстрируют средний по стране уровень тарифного разрыва - 0,009-0,012 долларов США /кВт·ч в базовом сценарии и 0,006-0,009 долларов США /кВт·ч в сниженном. Это

подтверждает благоприятный баланс между солнечным ресурсом, плотностью застройки и структурой капитальных и эксплуатационных расходов.

В Согдийской области тарифный разрыв выше среднереспубликанского уровня, что отражает повышенные капитальные и эксплуатационные издержки, характерные для более плотной и разнообразной застройки. Наибольшие значения зафиксированы в Канибадаме, Исфаре, Бободжон Гафурове и Аште, где в базовом сценарии тарифный разрыв составляет 0,014–0,015 долларов США /кВт·ч, а в сниженном - 0,010–0,011 долларов США /кВт·ч.

Таблица 4.7 содержит результаты расчётов среднего уровня субсидий, необходимых для обеспечения экономической реализуемости крышных ФЭС в разрезе районов Республики Таджикистан. Показатели представлены для двух сценариев - базового и со сниженными капитальными затратами - и выражены в долларах США /кВт установленной мощности.

Таблица 3.7. – Средний уровень субсидий при базовом и сниженном сценариях, долларов США/кВт

| Область | Район или город | Средний уровень субсидии (базовый сценарий) | Средний уровень субсидии (сниженный сценарий) |
|---------|-----------------|---|---|
| РРП     | Файзабад        | 126,520                                     | 93,115  |
|         | Гиссар          | 118,789                                     | 88,025  |
|         | Лахш            | 113,901                                     | 88,753  |
|         | Нуробод         | 105,388                                     | 80,266  |
|         | Рашт            | 125,217                                     | 96,340  |
|         | Рогун           | 124,738                                     | 94,552  |
|         | Рудаки          | 124,518                                     | 92,230  |
|         | Шахринав        | 118,620                                     | 87,466  |
|         | Сангвор         | 116,546                                     | 90,724  |
|         | Таджикабад      | 121,711                                     | 94,584  |
|         | Турсунзаде      | 132,856                                     | 97,169  |
|         | Вахдат          | 131,358                                     | 96,930  |
|         | Варзоб          | 111,576                                     | 82,615  |
|         | Сангвор         | 116,546                                     | 90,724  |
|         | Таджикабад      | 121,711                                     | 94,584  |

| Область               | Район или город           | Средний уровень<br>субсидии (базовый<br>сценарий) | Средний уровень субсидии<br>(сниженный сценарий) |
|-----------------------|---------------------------|---|--|
| РРП                   | Турсунзаде                | 132,856   | 97,169   |
|                       | Вахдат                    | 131,358   | 96,930   |
|                       | Варзоб                    | 111,576   | 82,615   |
|                       | Душанбе                   | 143,612   | 105,821  |
| ГБАО                  | Ишкашим                   | 107,436   | 79,501   |
|                       | Мургаб                    | 71,111  | 40,990   |
|                       | Рошткала                  | 157,527   | 117,420  |
|                       | Рушан                     | 93,884  | 71,827   |
|                       | Шугнан                    | 165,718   | 124,567  |
|                       | Ванч                      | 113,217   | 86,743   |
| Хатлонская<br>область | Балджувон                 | 98,699  | 72,868   |
|                       | Кушониён                  | 140,134   | 104,689  |
|                       | Дангара                   | 110,270   | 82,252   |
|                       | Фархор                    | 121,802   | 91,953   |
|                       | Дусти                     | 92,788  | 70,430   |
|                       | Джоми                     | 112,327   | 84,444   |
|                       | Ховалинг                  | 110,321   | 81,188   |
|                       | Хуросон                   | 112,197   | 83,843   |
|                       | Мир Сайид Али<br>Хамадони | 136,873   | 101,858  |
|                       | Муминобод                 | 102,663   | 76,363   |
|                       | Нурек                     | 109,016   | 81,578   |
|                       | Носири Хусрав             | 120,882   | 90,383   |
|                       | Пяндж                     | 128,080   | 96,394   |
|                       | Кабодиён                  | 137,519   | 102,333  |
|                       | Джайхун                   | 146,485   | 111,126  |
|                       | Леваконт                  | 129,906   | 97,166   |
|                       | Шахритус                  | 119,085   | 88,791   |
|                       | Темурмалик                | 106,305   | 78,945   |
|                       | Вахш                      | 100,065   | 74,929   |
|                       | Восеъ                     | 137,515   | 102,819  |
| Яван                  | 101,138                   | 75,295  |  |
| Согдийская<br>область | Ашт                       | 119,173   | 89,857   |
|                       | Айни                      | 103,110   | 77,822   |
|                       | Бободжон<br>Гафуров       | 175,306   | 135,320  |
|                       | Деваштич                  | 157,342   | 119,902  |
|                       | Исфара                    | 160,345   | 123,295  |

|                    | Район или город | Средний уровень субсидии (базовый сценарий) | Средний уровень субсидии (сниженный сценарий) |
|--------------------|-----------------|---|---|
| Согдийская область | Истаравшан      | 160,092                                     | 121,965                                       |
|                    | Джаббор Расулов | 186,548                                     | 144,560                                       |
|                    | Канибадам       | 173,166                                     | 134,180                                       |
|                    | Горная Матча    | 105,262                                     | 82,121  |
|                    | Матча           | 128,021                                     | 99,441  |
|                    | Пенджикент      | 127,381                                     | 94,106  |
|                    | Шахристон       | 113,375                                     | 85,783  |
|                    | Спитамен        | 170,612                                     | 131,938                                       |
|                    | Зафарабад       | 161,642                                     | 125,220                                       |

Анализ данных демонстрирует значительную территориальную дифференциацию субсидий, обусловленную как технологическими факторами (PVOUT, конструктивные особенности зданий, стоимость монтажа), так и социально-экономическими условиями отдельных регионов.

В районах РРП средний уровень субсидий в базовом сценарии составляет  $\approx 105$ – $133$  долларов США/кВт, в сниженном сценарии  $\approx 82$ – $97$  долларов США/кВт. Наиболее низкие значения субсидии наблюдаются в Гиссаре, Шахринаве и Варзобе, где уменьшающаяся стоимость оборудования резко снижает потребность в финансовой поддержке до уровня  $\approx 82$ – $88$  долларов США/кВт. Наиболее высокие значения характерны для Сангвора и Таджикабада ( $\approx 116$ – $122$  долларов США/кВт), что отражает сложные природные условия и повышенные логистические затраты.

В Душанбе потребность в субсидировании выше, чем в других центральных районах:  $143,6$  долларов США/кВт в базовом и  $105,8$  долларов США/кВт в сниженном сценарии. Это объясняется высокой стоимостью строительных работ и сложностью обеспечения оптимальных условий размещения оборудования в условиях плотной городской застройки. В регионах ГБАО наблюдается наиболее широкий диапазон значений. Мургаб характеризуется минимальными по стране значениями -  $71,1$  долларов США/кВт (базовый) и

41,0 долларов США/кВт (сниженный), что связано с крайне высоким уровнем солнечного ресурса и низкой себестоимостью электроэнергии. Напротив, Рошткала и Шугнан демонстрируют одни из максимальных значений субсидии по всей стране - 157–166 долларов США/кВт, что отражает суровые климатические условия, труднодоступность и высокие капитальные издержки на обустройство инженерных конструкций. В Хатлонской области средний уровень субсидий варьирует от  $\approx 98$  до 147 долларов США/кВт (базовый) и от  $\approx 72$  до 111 долларов США/кВт (сниженный). Наибольшие значения отмечены в районах Кушониён, Мир Сайид Али Хамадони, Кабодиён и Джайхун, что связано с относительно сложными условиями установки и эксплуатационными особенностями. Напротив, Дусти, Вахш и Яван демонстрируют минимальную потребность в субсидиях -  $\approx 70$ –75 долларов США/кВт при сниженном капитальных затрат, что указывает на высокую экономическую эффективность крышных ФЭС. В Согдийской области значения субсидий в целом выше среднереспубликанского уровня. Максимальные величины зафиксированы в Джаббор Расулове, Бободжон Гафурове, Спитамене, Исфаре и Зафарабаде - от  $\approx 161$  до 186 долларов США/кВт в базовом сценарии и от  $\approx 125$  до 145 долларов США/кВт в сниженном [2-А]. Это связано с сочетанием высокой стоимости строительства, архитектурной неоднородности и повышенных эксплуатационных требований. Наиболее низкие значения в области характерны для Айни, Пенджикента и Горной Матчи, таблица 3.8 содержит усреднённые показатели рентабельности крышных фотоэлектрических систем (ФЭС) по районам Республики Таджикистан и позволяет оценить территориальные различия по трём ключевым параметрам: Простой срок окупаемости (лет), среднему коэффициенту ориентации кровель и значению  $PVOUT$  ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кВт}_\text{п}$ ) как индикатору солнечной генерации. Совместный анализ этих параметров формирует целостное представление о потенциале распределённой солнечной энергетики в региональном разрезе.

Таблица 3.8. – Средние значения простого срока окупаемости, ориентации и солнечной генерации по районам Республики Таджикистан

| Область            | Район или город        | Простой срок окупаемости, лет | Средний коэффициент ориентации | Средняя PV <sub>out</sub> , кВт·ч/кВт |
|--------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| РРП                | Файзабад               | 133,56                        | 0,61                           | 1558,50                               |
|                    | Гиссар                 | 125,43                        | 0,64                           | 1567,52                               |
|                    | Лахш                   | 178,05                        | 0,65                           | 1455,54                               |
|                    | Нуробод                | 166,93                        | 0,62                           | 1481,88                               |
|                    | Рашт                   | 190,17                        | 0,60                           | 1458,87                               |
|                    | Рогун                  | 166,20                        | 0,61                           | 1489,66                               |
|                    | Рудаки                 | 133,83                        | 0,62                           | 1560,27                               |
|                    | Шахринав               | 127,57                        | 0,63                           | 1576,03                               |
|                    | Сангвор                | 250,72                        | 0,59                           | 1395,11                               |
|                    | Гаджикабад             | 221,69                        | 0,59                           | 1421,52                               |
|                    | Турсунзаде             | 130,08                        | 0,60                           | 1587,06                               |
|                    | Вахдат                 | 136,23                        | 0,61                           | 1560,02                               |
|                    | Варзоб                 | 136,33                        | 0,62                           | 1557,15                               |
|                    | Душанбе                | 130,60                        | 0,62                           | 1574,29                               |
| ГБАО               | Ишкашим                | 143,27                        | 0,60                           | 1552,76                               |
|                    | Мургаб                 | 82,98                         | 0,58                           | 1855,27                               |
|                    | Рошткала               | 148,54                        | 0,62                           | 1515,80                               |
|                    | Рушан                  | -                             | 0,63                           | 1443,81                               |
|                    | Шугнан                 | 154,94                        | 0,61                           | 1524,89                               |
|                    | Ванч                   | 215,91                        | 0,59                           | 1434,22                               |
| Хатлонская область | Балджувон              | 133,39                        | 0,61                           | 1560,38                               |
|                    | Кушониён               | 148,78                        | 0,60                           | 1524,44                               |
|                    | Дангара                | 137,65                        | 0,62                           | 1550,49                               |
|                    | Фархор                 | 151,31                        | 0,62                           | 1509,65                               |
|                    | Дусти                  | 133,54                        | 0,68                           | 1519,49                               |
|                    | Джоми                  | 145,37                        | 0,62                           | 1524,92                               |
|                    | Ховалинг               | 129,88                        | 0,62                           | 1555,63                               |
|                    | Хуросон                | 144,25                        | 0,61                           | 1536,83                               |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 157,41                        | 0,59                           | 1515,80                               |
|                    | Муминобод              | 139,89                        | 0,60                           | 1561,65                               |

| Область            | Район или город  | Простой срок окупаемости, лет | Средний коэффициент ориентации | Средняя $P_{VOUT}$ , кВт·ч/кВт |
|--------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Хатлонская область | Нурек            | 135,58                        | 0,64                           | 1532,70                        |
|                    | Носири Хусрав    | 150,58                        | 0,57                           | 1560,37                        |
|                    | Пяндж            | 162,43                        | 0,60                           | 1499,11                        |
|                    | Кабодиён         | 142,90                        | 0,59                           | 1559,35                        |
|                    | Джайхун          | 141,30                        | 0,64                           | 1521,59                        |
|                    | Леваканд         | 152,97                        | 0,58                           | 1534,46                        |
|                    | Шахритус         | 134,99                        | 0,62                           | 1562,49                        |
|                    | Темурмалик       | 128,71                        | 0,64                           | 1559,65                        |
|                    | Вахш             | 138,26                        | 0,63                           | 1529,59                        |
|                    | Восеъ            | 144,33                        | 0,62                           | 1527,65                        |
|                    | Яван             | 128,85                        | 0,65                           | 1545,91                        |
| Согдийская область | Ашт              | 174,30                        | 0,60                           | 1476,02                        |
|                    | Айни             | –                             | 0,64                           | 1505,29                        |
|                    | Бободжон Гафуров | 195,04                        | 0,59                           | 1456,16                        |
|                    | Деваштич         | 166,84                        | 0,62                           | 1482,52                        |
|                    | Исфара           | 200,90                        | 0,58                           | 1452,03                        |
|                    | Истаравшан       | 156,88                        | 0,63                           | 1498,79                        |
|                    | Джаббор Расулов  | 191,31                        | 0,62                           | 1445,83                        |
|                    | Канибадам        | 214,76                        | 0,59                           | 1424,08                        |
|                    | Горная Матча     | 228,40                        | 0,62                           | 1424,46                        |
|                    | Матча            | 178,03                        | 0,66                           | 1439,27                        |
|                    | Пенджикент       | –                             | 0,66                           | 1572,88                        |
|                    | Шахристон        | 144,68                        | 0,65                           | 1503,36                        |
|                    | Спитамен         | 187,07                        | 0,63                           | 1439,91                        |
| Зафарабад          | 179,83           | 0,63                          | 1455,78                        |                                |
| Итого              |                  | 157,18                        | 0,62                           | 1517,07                        |

Результаты подтверждают сильную зависимость экономических параметров крышных ФЭС от качества ориентации и уровня солнечной генерации. Районы с высоким  $P_{VOUT}$  и хорошей ориентацией (Мургаб, Яван, Джайхун, Турсунзаде) демонстрируют конкурентоспособный срок окупаемости. Горные районы с низким коэффициентом ориентации или низким  $P_{VOUT}$  требуют дополнительных механизмов поддержки - субсидий, тарифных стимулирующих мер и адресных программ развития.

Таблица 3.9 отражает суммарную стоимость установки крышных ФЭС в разрезе районов, а также соответствующую чистую приведённую стоимость при расчёте по базовому тарифному сценарию.

Таблица 3.9. – Показатели стоимости установки и чистой приведённой стоимости проекта по районам Республики Таджикистан

| Область            | Район или город        | Общая стоимость установки в долларах США | Суммарная чистая приведённая стоимость, долларов США |
|--------------------|------------------------|--|--|
| РРП                | Файзабад               | 614553264,0                              | -556356209,8   |
|                    | Гиссар                 | 2045551401,6                             | -1821131030,4  |
|                    | Лахш                   | 3419990,4                                | -3136842,1   |
|                    | Нуробод                | 391262409,6                              | -357235263,3   |
|                    | Рашт                   | 996925430,4                              | -922666732,0   |
|                    | Рогун                  | 359620512,0                              | -330744251,1   |
|                    | Рудаки                 | 3480988560,0                             | -3147026803,3  |
|                    | Шахринав               | 1562395987,2                             | -1397562299,0  |
|                    | Сангвор                | 53967283,2                               | -50768216,5  |
|                    | Таджикабад             | 202094707,2                              | -189114955,7   |
|                    | Турсунзаде             | 2055010396,8                             | -1867837351,1  |
|                    | Вахдат                 | 2033818972,8                             | -1839002810,3  |
|                    | Варзоб                 | 1070330256,0                             | -965882056,9   |
|                    | Душанбе                | 3219491740,8                             | -2899212798,4  |
| ГБАО               | Ишкашим                | 13563456,0                               | -12364153,6  |
|                    | Мургаб                 | 11164857,6                               | -9712812,4   |
|                    | Рошткала               | 66010262,4                               | -60190483,3  |
|                    | Рушан                  | 17116876,8                               | -15711522,8  |
|                    | Шугнан                 | 139814985,6                              | -127671986,7   |
|                    | Ванч                   | 16098240,0                               | -15110563,1  |
| Хатлонская область | Балджувон              | 146919859,2                              | -133532967,9   |
|                    | Кушониён               | 2342459625,6                             | -2148595071,0  |
|                    | Дангара                | 1149433228,8                             | -1042480923,8  |
|                    | Фархор                 | 1197935769,6                             | -1090615745,7  |
|                    | Дусти                  | 14521478,4                               | -12878362,5  |
|                    | Джоми                  | 1263059251,2                             | -1145928305,2  |
|                    | Ховалинг               | 335768352,0                              | -303655341,7   |
|                    | Хуросон                | 1114163520,0                             | -1016912708,4  |
|                    | Мир Сайид Али Хамадони | 94218000,0                               | -87288946,2  |
|                    | Муминобод              | 12740832,0                               | -11648984,7  |
|                    | Нурек                  | 450192988,8                              | -404126740,5   |

| Область            | Район или город  | Общая стоимость установки в долларах США | Суммарная чистая приведённая стоимость, доллары США |
|--------------------|------------------|--|---|
| Хатлонская область | Носири Хусрав    | 379764960,0                              | -350196036,8  |
|                    | Пяндж            | 768651600,0                              | -709370828,3  |
|                    | Кабодиён         | 595258204,8                              | -545961816,3  |
|                    | Джайхун          | 430064678,4                              | -387414893,4  |
|                    | Леваконт         | 344735347,2                              | -319476798,3  |
|                    | Шахритус         | 1306801593,6                             | -1185113889,9                                       |
|                    | Темурмалик       | 529571481,6                              | -477129810,3  |
|                    | Вахш             | 395112604,8                              | -358159017,6  |
|                    | Восеъ            | 593039875,2                              | -539701088,1  |
|                    | Яван             | 1568352336,0                             | -1405551905,0                                       |
| Согдийская область | Ашт              | 1442633347,2                             | -1336136903,0                                       |
|                    | Айни             | 502134019,2                              | -451361045,3  |
|                    | Бободжон Гафуров | 5186707689,6                             | -4822120792,2                                       |
|                    | Деваштич         | 518691590,4                              | -475755494,1  |
|                    | Исфара           | 2426243683,2                             | -2269331193,8                                       |
|                    | Истаравшан       | 1007240112,0                             | -915329061,9  |
|                    | Джаббор Расулов  | 1254896774,4                             | -1157915163,5                                       |
|                    | Канибадам        | 2061460713,6                             | -1926155876,7                                       |
|                    | Горная Матча     | 57537235,2                               | -53032419,2   |
|                    | Матча            | 1125854227,2                             | -1023596387,6                                       |
|                    | Пенджикент       | 2250798451,2                             | -1978884401,0                                       |
|                    | Шахристон        | 372090547,2                              | -334387494,6  |
|                    | Спитамен         | 1315197868,8                             | -1202807833,8                                       |
|                    | Зафарбад         | 202979126,4                              | -185839482,0  |
| Итого              |                  | 53110430563,2                            | -48396832872,3                                      |

Проведённая оценка капитальных затрат и чистой приведённой стоимости проектов крышных фотоэлектрических систем демонстрирует устойчивую территориальную неоднородность экономической эффективности. Несмотря на значительный технический потенциал, во всех районах Республики Таджикистан суммарная ЧПС сохраняет отрицательное значение. Это отражает недоступность окупаемости проектов при действующей тарифной политике и отсутствии стимулирующих механизмов поддержки распределённой солнечной генерации. Наиболее капиталоемкие

установки приходится на густонаселённые районы и города - в первую очередь Душанбе, Рудаки, Бободжон Гафуров, Исфара, Гиссар и Турсунзаде. Высокая стоимость установки в них обусловлена масштабом доступной крыши, плотностью застройки и совокупной установленной мощностью. Эти же территории формируют наибольшую величину отрицательного ЧПС, что делает их ключевыми зонами, где эффект от введения субсидий и «зелёных тарифов» будет наиболее существенным.

### **3.4. Сравнение экономической рентабельности крышных ФЭС между странами Центральной Азии**

Центральная Азия, включающая Казахстан, Таджикистан, Узбекистан, Кыргызстан и Туркменистан, представляет собой уникальный случай в контексте глобального энергетического перехода. Этот регион получает одни из самых высоких уровней солнечной радиации в Евразии. Однако, несмотря на этот значительный потенциал, использование фотоэлектрических систем на крышах остается ограниченным. Одним из основных препятствий является отсутствие подробных геопространственных данных, таких как лидарные или 3D-модели зданий, которые необходимы для точной оценки потенциала. Существующие инструменты, такие как Mapdwell, SolarMapper и EU PVGIS Roof-top Tool, либо ограничены городами с детализированными данными, либо основаны на коммерческих источниках, что делает их непригодными для крупномасштабных приложений в регионах с ограниченными данными.

Недавние исследования подчеркивают потенциал открытых геопространственных данных, таких как OSM, для оценки солнечного потенциала на больших территориях. Однако многие из этих подходов упрощают геометрию крыши или применяют фиксированные предположения об азимуте, снижая точность их оценок. В некоторых моделях предусмотрена ориентация на крышу, но они часто требуют детализированных входных данных или значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применимость в условиях ограниченных ресурсов. Это создает потребность в масштабируемой и воспроизводимой методологии, способной точно оценить

потенциал солнечных фотоэлектрических систем на крышах, используя только данные из открытых источников и легкие вычислительные инструменты.

Данное исследование устраняет этот пробел, предлагая новую методологию оценки потенциала солнечных фотоэлектрических систем на крышах в Центральной Азии. Используя данные OSM о местоположении зданий и методику MRR, метод определяет ориентацию крыши, что позволяет более точно оценить эффективную освещенность без необходимости в данных об уклоне или высоте.

Реализованная на Python с использованием библиотек с открытым исходным кодом, методология обеспечивает высокую вычислительную эффективность и адаптивность, что делает ее подходящей для крупномасштабных приложений в различных контекстах. Это исследование содержит предварительную оценку потенциала фотоэлектрических систем на крышах в Центральной Азии и оценивает экономическую жизнеспособность таких систем в различных политических и финансовых условиях, предлагая ценную информацию для энергетического планирования и принятия инвестиционных решений.

Значимость этого исследования выходит за рамки Центральной Азии. Демонстрируя осуществимость подходов, основанных на открытых данных, в регионах с дефицитом данных, исследование вносит вклад в глобальную дискуссию о переходе к возобновляемой энергетике в развивающихся странах. Это согласуется с целями устойчивого развития Организации Объединенных Наций, в частности с ЦУР 7, способствуя внедрению децентрализованных возобновляемых источников энергии. Методология масштабируема и может быть перенесена в другие регионы, сталкивающиеся с аналогичными ограничениями данных, поддерживая глобальные усилия по ускорению перехода к «зеленой» энергетике.

Важно отметить, что предлагаемая методика обеспечивает надежную предварительную оценку, но не учитывает такие факторы, как наклон крыши, окружающие препятствия или затенение от близлежащих сооружений,

которые могут повлиять на фактическую отдачу энергии. В будущих исследованиях могут быть использованы дополнительные источники данных или передовые методы моделирования для уточнения этих оценок. Тем не менее, для таких целей, как энергетическое планирование, зонирование и предварительные технико-экономические оценки, этот подход является ценным инструментом, особенно в отсутствие подробных геопространственных данных.

**Источники данных и предварительная обработка.** Данные о площади крыш зданий были получены из OSM, которая обеспечивает обширный глобальный охват и широко используется для оценки фотоэлектрических характеристик крыш. Каждый многоугольник здания обрабатывается в формате шейп-файла, а площадь крыши  $A_{roof}$  вычисляется с использованием геометрических функций. Полигоны площадью менее  $10 \text{ м}^2$  исключаются как непригодные для установки. Все геометрические параметры перепроецируются в систему координат проекции для конкретной страны (CRS) для обеспечения пространственной точности в метрах: EPSG:32642 для Казахстана, Таджикистана, Узбекистана и Туркменистана, EPSG:32643 для Кыргызстана.

Недопустимые или пустые геометрии удаляются с помощью исправления нулевого буфера, как это предлагается в методах очистки топологических данных. Солнечный потенциал оценивается с использованием растров PVOUT из PVGIS (Фотоэлектрической географической информационной системы), которые обеспечивают долгосрочную среднегодовую выработку фотоэлектрической энергии в  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кВт}_\text{п}$  в соответствии со стандартными предположениями о фотоэлектрической системе. Разрешение растра составляет  $\sim 1 \text{ км}$ , а данные находятся в открытом доступе в Объединенном исследовательском центре Европейской комиссии. Центроид каждого здания проецируется на CRS растра, а значение PVOUT определяется с помощью билинейной интерполяции. Это позволяет распределять мощность солнечной энергии в зависимости от местоположения

на каждой крыше. Экономические параметры для конкретной страны, включая тарифы на электроэнергию, ставки дисконтирования, капитальные затраты, множители на установку и эксплуатационные расходы, были собраны на основе нормативных документов, данных о национальном рынке и международных отчетов [137,1-А]. Эти параметры служат важными исходными данными для экономического моделирования и обобщены в таблице 3.10.

Таблица 3.10. – Финансовые показатели солнечных проектов в странах Центральной Азии

| Страна       | Стоимость электроэнергии USD/кВтч | Стоимость оборудования USD/кВт | Коэффициент затрат | Техническое обслуживание | Ставка дисконтирования | Маржа |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|-------|
| Казахстан    | 0.057                             | 850                            | 1,25               | 20                       | 0.08                   | 0.15  |
| Таджикистан  | 0.032                             | 820                            | 1,2                | 18                       | 0.11                   | 0.15  |
| Узбекистан   | 0.043                             | 800                            | 1,22               | 19                       | 0.09                   | 0.15  |
| Киргизстан   | 0.016                             | 830                            | 1,23               | 17                       | 0.10                   | 0.15  |
| Туркменистан | 0.006                             | 790                            | 1,25               | 16                       | 0.09                   | 0.15  |

Примечание: Все экономические параметры являются средними по стране, основанными на нормативных и международных источниках.

Надежность предложенной методологии была оценена путем сравнительной проверки с данными наблюдений за выработкой энергии с помощью действующих фотоэлектрических систем на крышах в Душанбе (Таджикистан). Расчетные годовые объемы производства электроэнергии, полученные на основе модели, показали среднее отклонение в пределах  $\pm 10\%$  относительно контрольных показателей PVGIS. Этот уровень точности согласуется с результатами сопоставимых исследований, в которых используются пространственные агрегированные оценки солнечного потенциала, и подтверждает применимость модели для предварительных оценок в национальном масштабе. Тем не менее, следует признать ряд ограничений текущей реализации. Во-первых, модель предполагает фиксированный угол наклона для всех крыш, игнорируя фактические наклоны

крыш и потенциальную оптимизацию. Во-вторых, эффекты затенения учитываются с использованием единого коэффициента уменьшения, без детального геометрического или временного анализа тени. В-третьих, данные OSM о площади застройки, хотя и обеспечивают широкий охват, могут страдать от геометрических неточностей или неполноты, особенно в пригородных и сельских районах. Наконец, экономические параметры, такие как капитальные затраты, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, тарифы на электроэнергию и ставки дисконтирования, определяются на национальном уровне и не учитывают субнациональные различия или динамичные рыночные тенденции. Несмотря на глобальную доступность данных OSM для зданий, они могут иметь геометрические неточности и пробелы в покрытии. Это особенно актуально для сельских регионов, где плотность картографирования невелика. Дополнительная проверка на местах или составление спутниковых описей зданий повысили бы точность.

Эти ограничения типичны для оценок регионального масштаба, проводимых в отсутствие моделей рельефа с высоким разрешением (например, лидарных, ЦМП) и подробных полевых данных. Несмотря на эти ограничения, платформа обеспечивает надежную и масштабируемую основу для оценки потенциала фотоэлектрических систем на крышах и информативного энергетического планирования в условиях нехватки данных. Хотя метод минимального повернутого прямоугольника обеспечивает простоту вычислений и масштабируемость, его оценка ориентации может быть менее точной, чем методы, основанные на анализе главных компонент или углах наклона, полученных с помощью лидара. Однако для таких методов требуются подробные данные о высоте, которые недоступны для многих регионов Центральной Азии.

**Технический потенциал фотоэлектрических систем на крышах.** Геопространственный анализ потенциала солнечной фотоэлектрической системы (PV) на крышах в пяти странах Центральной Азии – Казахстане,

Таджикистане, Кыргызстане, Туркменистане и Узбекистане – выявил значительные различия в установленной мощности и годовой выработке энергии, обусловленные различиями в фонде зданий, плотности городского населения и солнечной радиации. В таблице 3.11 приведены основные технические показатели, полученные в результате анализа. Казахстан демонстрирует самый высокий потенциал: установленная мощность составляет 61,43 ГВт в 2,66 млн зданий, что обеспечивает ежегодную выработку 49,00 ТВтч. За ним следует Узбекистан с 35,07 ГВт мощности и 32,28 ТВтч выработки электроэнергии в 1,05 млн зданий. Небольшие страны, такие как Кыргызстан (12,32 ГВт, 10,67 ТВтч) и Таджикистан (9,92 ГВт, 8,68 ТВтч), демонстрируют меньшую абсолютную мощность, но значительную площадь крыш на душу населения, что подчеркивает возможности для децентрализованных фотоэлектрических систем в отдаленных или автономных регионах. Туркменистан, в котором насчитывается 151085 зданий, обеспечивает мощность в 6,41 ГВт и выработку электроэнергии в 6,52 ТВтч, что означает самый высокий в регионе удельный выход электроэнергии (PVOUT) - 1584,89 кВт·ч/кВт

Таблица 3.11. – Технический потенциал крышных фотоэлектрических систем в Центральной Азии

| Страна       | Здания (млн) | Общая площадь крыши (млн м <sup>2</sup> ) | Полезная площадь крыши (млн м <sup>2</sup> ) | Мощность, (ГВт) | Генерация (ТВтч/год) | PVOUT (кВтч/кВт) |
|--------------|--------------|---|--|-----------------|----------------------|------------------|
| Казахстан    | 2,66         | 607.38                                    | 348.62                                       | 61.43           | 49,00                | 1345,4           |
| Узбекистан   | 1,05         | 321.40                                    | 198.48                                       | 35.07           | 32,28                | 1551,47          |
| Киргизстан   | 0,65         | 113.93                                    | 70.02  | 12,24           | 10,67                | 1466,91          |
| Таджикистан  | 0,47         | 89.07                                     | 56.31  | 9,92            | 8,68                 | 1544,36          |
| Туркменистан | 2,66         | 57.08                                     | 36.25  | 6,41            | 6,52                 | 1584,89          |

Примечание: Данные получены из базы данных OSM.

На Рис.3.8 показано распределение установленной мощности и годовой выработки электроэнергии по пяти странам, что выделяет Казахстан и

Узбекистан в качестве региональных лидеров. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями солнечного потенциала в регионах с высокой освещенностью, но использование геопространственных данных с открытым исходным кодом обеспечивает масштабируемость в условиях дефицита данных по сравнению с подходами, основанными на лидарах.

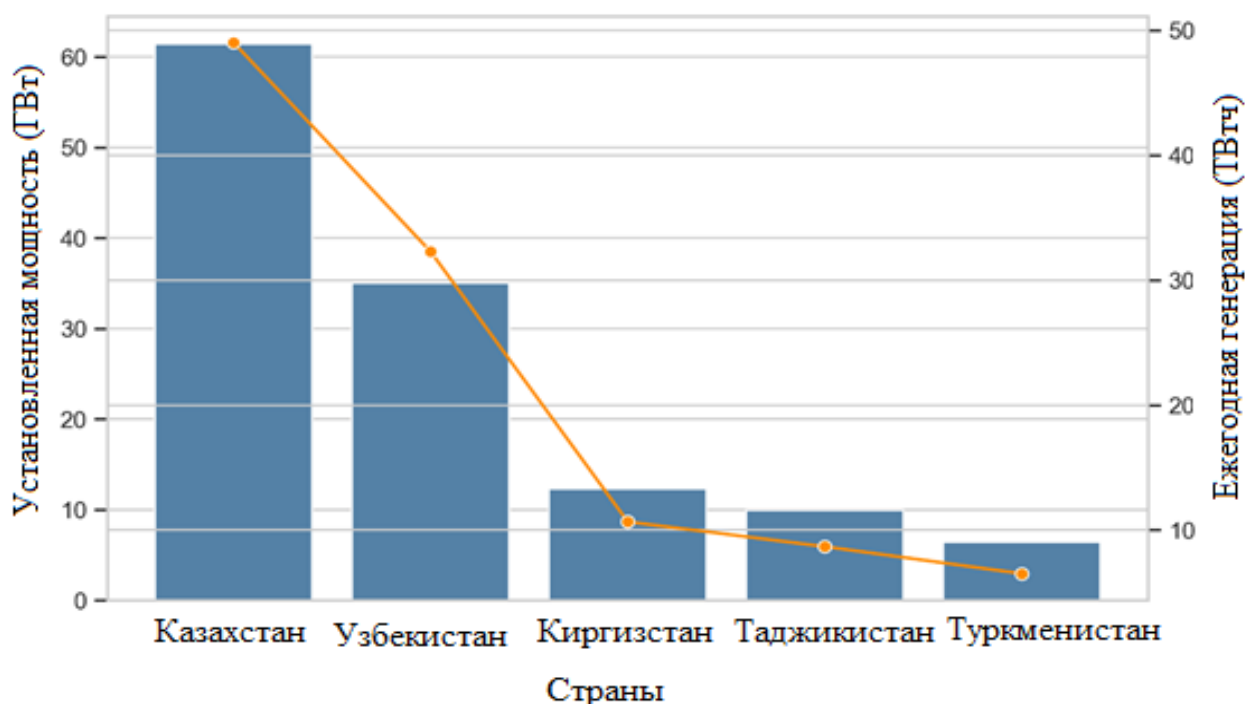


Рисунок 3.8. – Гистограмма мощности солнечных батарей на крышах и годовой выработки электроэнергии в разбивке по странам.

Гистограмма, сравнивающая установленную фотоэлектрическую мощность (ГВт, левая ось) и годовую выработку энергии (ТВтч/год, правая ось) в Казахстане, Узбекистане, Таджикистане, Кыргызстане и Туркменистане. Казахстан и Узбекистан лидируют по обоим показателям, в то время как Туркменистан демонстрирует высокую эффективность генерации благодаря превосходной мощности. На Рис.3.9 представлена подробная пространственная визуализация потенциала фотоэлектрических систем на крышах пяти столиц - Астаны, Ашхабада, Душанбе, Ташкента и Бишкека - демонстрирующая различия в устанавливаемых мощностях внутри городов. Цветовая маркировка контуров зданий отражает расчетную мощность фотоэлектрической системы на крыше, при этом наибольшие значения (до 400

кВт) отмечены в коммерческих и институциональных зданиях. Эти визуальные схемы подчеркивают важность планирования на уровне города, особенно в плотной городской застройке, где объединение систем на крышах может повысить интеграцию сетей и экономическую эффективность.

**Ориентация крыши и полезная площадь.** Пригодность крыш для ориентации, оцененная с использованием метода MRR, применяемого к контурам зданий OSM, дает средние коэффициенты ориентации в диапазоне от 0,611 (Таджикистан) до 0,663 (Туркменистан), как показано в таблице 3.12. Эти значения указывают на умеренное выравнивание с оптимальными азимутами, ориентированными на юг, что способствует эффективному получению фотоэлектрической энергии, несмотря на отсутствие данных об угле крыши. Полезная площадь крыши, скорректированная с учетом препятствий, расстояния между наклонами и эмпирических коэффициентов удобства использования, колеблется от 57,4% от общей площади крыши в Казахстане (348,62 млн. м<sup>2</sup> из 607,38 млн. м<sup>2</sup>) до 66,3% в Таджикистане (56,31 млн. м<sup>2</sup> из 89,07 млн. м<sup>2</sup> [8-А]).

Таблица 3.12. – Ориентация и показатели полезной площади

| Страна       | Коэффициент ориентации | Соотношение полезной площади (%) |
|--------------|------------------------|----------------------------------|
| Казахстан    | 0,627                  | 57,4                             |
| Узбекистан   | 0,644                  | 61,8                             |
| Киргизстан   | 0,628                  | 61,5                             |
| Таджикистан  | 0,611                  | 66,3                             |
| Туркменистан | 0,663                  | 63,5                             |

*Примечание:* Коэффициенты ориентации рассчитаны с использованием метода MRR; соотношение полезной площади учитывает препятствия и расстояние между наклонами. Принятый подход позволяет повысить достоверность оценки технического потенциала за счёт более точного учёта геометрических и эксплуатационных ограничений кровельных поверхностей.

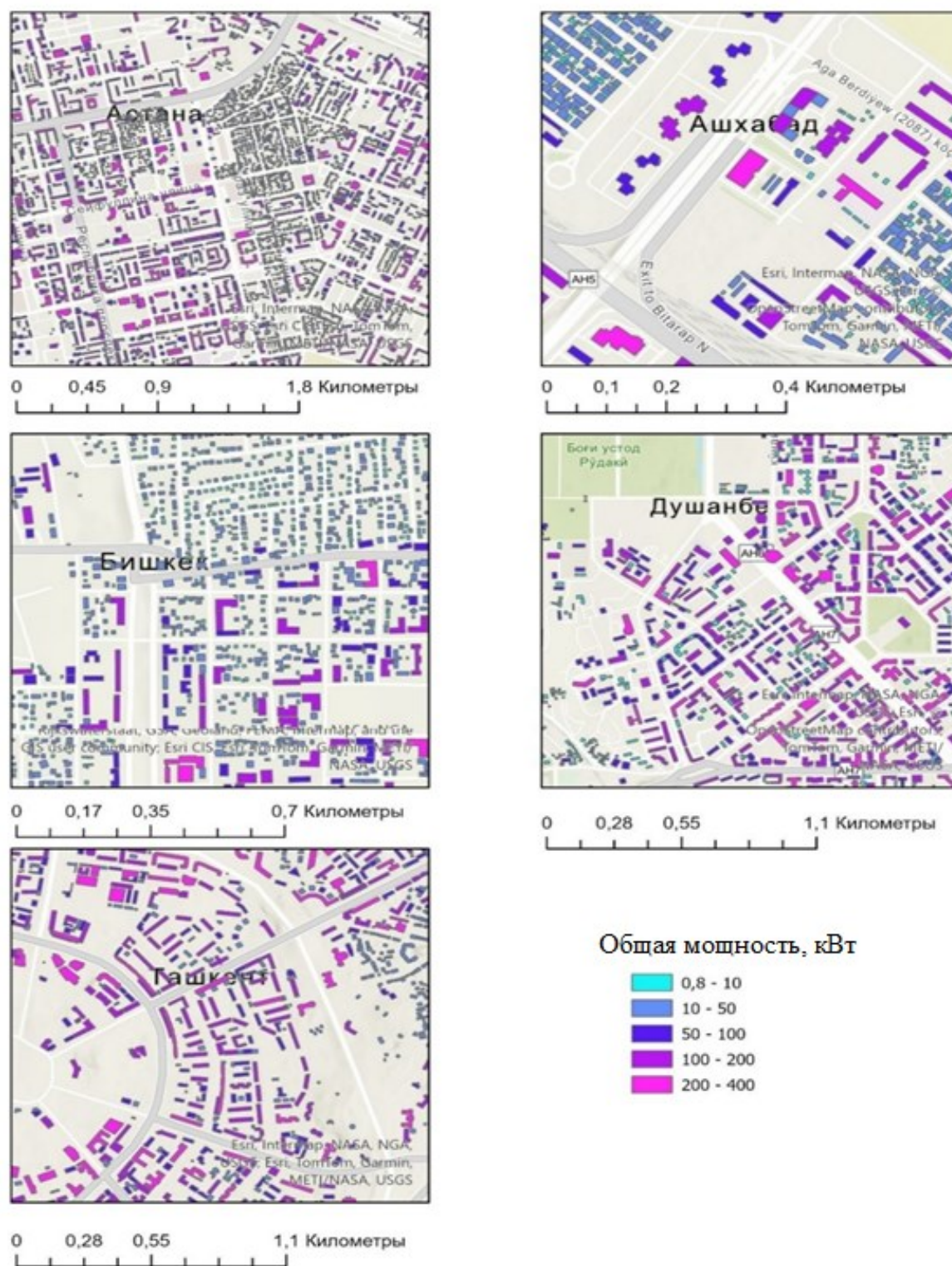


Рисунок 3.9. – Карта мощности фотоэлектрических систем на крышах столичных городов.

Анализ ориентации на основе MRR продвигает предыдущие исследования, предполагающие единые азимуты, предлагая эффективный с точки зрения вычислений показатель пригодности крыши. Однако допущения о фиксированном наклоне и коэффициентах потери равномерного расстояния

могут привести к завышению полезной площади в сложных городских условиях, где затенение является значительным. ПСЭ при базовых допущениях колеблется от 0,0273 долларов США/кВт·ч в Туркменистане до 0,0378 долларов США/кВт·ч в Казахстане, как показано в таблице 3.13. Эти значения соответствуют мировым стандартам в области фотоэлектрической энергетики, что указывает на экономическую целесообразность в большинстве стран. Однако срок окупаемости значительно варьируется из-за различий в тарифах на электроэнергию и экономических параметрах.

Таблица 3.13. – Экономические показатели для фотоэлектрических систем на крышах

| Страна       | Стоимость электроэнергии USD/кВтч | срок окупаемости проекта (год) | чистую приведённую стоимость проекта (USD) | Тариф электроэнергия USD/кВтч |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|
| Казахстан    | 0.0378                            | 52.83                          | -48.56                                     | 0.057                         |
| Узбекистан   | 0.0320                            | 59.49                          | -27.14                                     | 0.043                         |
| Киргизстан   | 0.0351                            | 7284.42                        | -12.92                                     | 0.016                         |
| Таджикистан  | 0.0371                            | 180.88                         | -8.92                                      | 0.032                         |
| Туркменистан | 0.0273                            | Undefined                      | -6.96                                      | 0.006                         |

*Примечание:* ПСЭ и РР рассчитаны с использованием экономических параметров для конкретной страны из таблицы 2.1 в методологии.

В Казахстане и Узбекистане показатели срок окупаемости составляют 52,83 и 59,49 лет соответственно, что приближается к долгосрочной целесообразности. В отличие от этого, срок службы электростанции в Кыргызстане превышает 7 284 года из-за сильно субсидируемых тарифов (0,016 долларов США/кВт/кВт·ч), что делает внедрение фотоэлектрических систем экономически нецелесообразным без вмешательства. Срок окупаемости Таджикистана, составляющий 180,88 лет, отражает аналогичные проблемы, в то время как неопределенный срок окупаемости Туркменистана обусловлен отрицательной годовой прибылью, обусловленной чрезвычайно низким тарифом (0,006 долларов США/кВт·ч). Показатель срока окупаемости,

отмеченный как "неопределенный" или чрезвычайно высокий, отражает сценарии, при которых годовая операционная прибыль равна нулю или отрицательна, как правило, из-за очень низких цен на электроэнергию (например, в Туркменистане они составляют 0,006 долларов США/кВт·ч), что делает окупаемость неосуществимой без субсидий. Были проанализированы сценарии "зеленых" тарифов для оценки внедрения фотоэлектрических систем, обусловленных политикой. В таблице 3.14 представлены различия в тарифах и требования к субсидиям. В Казахстане и Узбекистане отрицательный разрыв в тарифах (-0,0136 долларов США/кВт·ч и - 0,0062 долларов США/кВт·ч, соответственно) указывает на то, что "зеленые" тарифы (0,0434 долларов США/кВт·ч и 0,0368 долларов США/кВт·ч) превышают ПСЭ, что позволяет внедрять их без субсидий при благоприятной политике льготирования. И наоборот, Кыргызстан и Туркменистан демонстрируют положительную разницу в тарифах (0,0243 долларов США/кВт·ч и 0,0254 долларов США/кВт·ч), что требует субсидий. Требования к субсидиям варьируются от 27,84 долларов США/кВт в Узбекистане до 1622,22 долларов США/кВт в Туркменистане, при этом Кыргызстану и Таджикистану требуется 453,17 долларов США/кВт и 246,55 долларов США/кВт соответственно.

Таблица 3.14. - Требования к зеленым тарифам и субсидиям

| Страна       | Зелёный тариф<br>тариф USD/кВтч | Тарифный разрыв<br>USD/кВтч | Субсидия<br>USD/кВтч |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Казахстан    | 0.0434                          | -0.0136                     | 0.82                 |
| Узбекистан   | 0.0368                          | -0.0062                     | 27.84                |
| Киргизстан   | 0.0403                          | 0.0243                      | 453.17               |
| Таджикистан  | 0.0427                          | 0.0107                      | 246.55               |
| Туркменистан | 0.0314                          | 0.0254                      | 1,622.22             |

*Примечание:* Тарифные разрывы и субсидии рассчитываются на основе базовых сценариев ПСЭ и "зеленого" тарифа.

Казахстан и Узбекистан имеют хорошие возможности для крупномасштабного размещения фотоэлектрических систем на крышах, используя свой высокий технический потенциал (61,43 ГВт и 35,07 ГВт) и

конкурентоспособные значения ПСЭ. Городские центры в этих странах могут извлечь выгоду из эффекта масштаба и агрегирования спроса. Кыргызстан и Таджикистан, несмотря на высокий потенциал солнечной энергетики (1466,91 кВт·ч/кВт и 1544,36 кВт·ч/кВт), сталкиваются с экономическими барьерами из-за низких тарифов, что требует тарифных реформ или капитальных субсидий. Исключительные ресурсы солнечной энергии в Туркменистане ограничены экономическими и нормативными проблемами, поэтому в качестве начальных шагов предлагаются пилотные проекты или инициативы, финансируемые донорами. В то время как Казахстан и Узбекистан внедрили предварительные механизмы поддержки, такие как учет чистой энергии, аукционы солнечной энергии и мандаты на возобновляемые источники энергии, в других странах Центральной Азии, в частности в Таджикистане, Кыргызстане и Туркменистане, по-прежнему отсутствуют надежные механизмы для размещения фотоэлектрических систем на крышах. В Казахстане системы на крышах мощностью до 100 кВт имеют право на учет чистой энергии, а домохозяйства в не электрифицированных зонах могут получать субсидии в размере до 50% от общей стоимости на приобретение фотоэлектрического оборудования. Узбекистан обязал государственные учреждения обеспечивать 54% потребностей в энергии из возобновляемых источников к 2030 году и ввел штрафные санкции за несоблюдение требований с помощью "зеленых сертификатов". В отличие от всего этого, Таджикистан только недавно принял резолюцию от 2024 года, требующую установки фотоэлектрических систем во вновь построенных общественных и жилых зданиях, но не имеет экономических стимулов или политики поддержки электросетей. Кыргызстан и Туркменистан не оказывают конкретной поддержки системам на крыше, и их внедрение по-прежнему ограничивается пилотными или демонстрационными проектами, финансируемыми донорами.

Внедрение структурированных механизмов поддержки, таких как налоговые льготы, кредиты под низкие проценты или гарантированные льготные тарифы, может значительно повысить экономическую

целесообразность использования фотоэлектрических систем на крышах в этих странах. Использование методологии на основе данных из открытых источников и масштабируемых геопространственных инструментов повышает ее применимость для энергетического планирования в регионах с дефицитом данных, способствуя достижению ЦУР 7. Проверка на соответствие действующим фотоэлектрическим системам в Душанбе (отклонение  $\pm 10\%$  от контрольных показателей PVGIS) подтверждает надежность предварительных оценок, хотя ограничения, такие как допущения о фиксированном наклоне и отсутствие анализа затенения, указывают на возможности для уточнения. Сгенерированные геопространственные данные предоставляют директивным органам полезную информацию, способствующую основанному на фактических данных энергетическому планированию в Центральной Азии и за ее пределами.

### **3.5. Экспериментальная валидация влияния угла наклона модулей на выработку**

Оптимизация угла наклона фотоэлектрических модулей является одним из ключевых конструктивных параметров, определяющих энергетическую эффективность фотоэлектрической системы. В условиях выраженной сезонной вариации угла возвышения Солнца над горизонтом, характерной для Центральной Азии, значение угла наклона особенно критично в зимний период, когда косинусные потери возрастают из-за малого угла падения солнечного излучения на поверхность модуля. Несмотря на наличие теоретических и имитационных исследований по оптимизации наклона, эмпирические данные для реальных крышных установок в условиях Таджикистана ограничены, что затрудняет формирование регионально обоснованных проектных рекомендаций.

В настоящем исследовании выполнено сопоставление трёх фотоэлектрических подсистем, размещённых на одной и той же крышной электростанции в окрестностях Худжанда (север Таджикистана), с углами наклона  $30^\circ$  и  $10^\circ$ . Мониторинговые данные за январь–июль 2025 года

использованы для количественной оценки влияния угла наклона на удельную выработку, с акцентом на зимний режим работы.

Исследуемая система имеет установленную мощность около 218 кВт (Рис.3.10) и построена на базе двух сетевых инверторов Huawei SUN2000-110KTL-M2 и монокристаллических модулей Jinko Solar JKM580M-72HL4-BDVP. Подсистемы распределены следующим образом:

- модули с наклоном  $30^\circ$  подключены к инвертору №1;
- часть модулей с наклоном  $10^\circ$  подключена к инвертору №1;
- дополнительный массив с наклоном  $10^\circ$  подключен к инвертору №2 ( $\approx 110$  кВт).

Таким образом, сравнение выполняется в идентичных климатических условиях, при одинаковых типах модулей и инверторов, но при различной геометрии установки.



Рисунок 3.10. – Исследуемая фотоэлектрическая система на крыше: слева несущие конструкции под углом  $30^\circ$ , посередине и справа под углом  $10^\circ$ .

В качестве исходных данных использовались показания счётчиков энергии на уровне МРРТ (DC-энергия,  $E_{DC}$ ). Инкрементные значения  $\Delta E_{DC}$  получены дифференцированием накопленных показаний; отрицательные и ложные записи удалены. Нормализация выполнена по установленной мощности (кВт·ч/кВт<sub>п</sub>). Были проанализированы следующие показатели:

- месячная удельная выработка;

- среднесуточные профили;
- почасовые временные ряды;
- 24-часовое скользящее среднее удельной выработки.

В часы генерации конфигурация  $30^\circ$  продемонстрировала устойчивое преимущество: суммарная удельная выработка за период составила 727 кВт·ч/кВтп, тогда как для  $10^\circ$  получено 534 кВт·ч/кВтп (инвертор №1) и 613 кВт·ч/кВтп (инвертор №2). Это соответствует снижению на 26,6% и 15,8% соответственно при малом наклоне. Различие между двумя подсистемами с одинаковым углом  $10^\circ$  обусловлено не геометрией, а эксплуатационными факторами: отличиями в конфигурации стрингов, распределении по МРРТ и режимом работы zero-export (запрет обратной подачи энергии в сеть). В полуденные часы при снижении внутренней нагрузки инверторы принудительно ограничивают генерацию (generation curtailment), что приводит к смещению рабочей точки МРРТ и искусственному снижению регистрируемой выработки. Данный эффект учитывается при интерпретации почасовых профилей и не влияет на выводы о влиянии угла наклона. В январе–феврале, когда угол возвышения Солнца минимален, подсистема  $30^\circ$  обеспечивала около 110 кВт·ч/кВтп против 79–81 кВт·ч/кВтп для  $10^\circ$ , что соответствует потере 27–28% при малом наклоне. Угол  $30^\circ$  близок к теоретически рекомендуемому зимнему углу для широты Худжанда, что позволяет рассматривать данную конфигурацию как условно эталонную для зимнего режима [5-А,6-А].

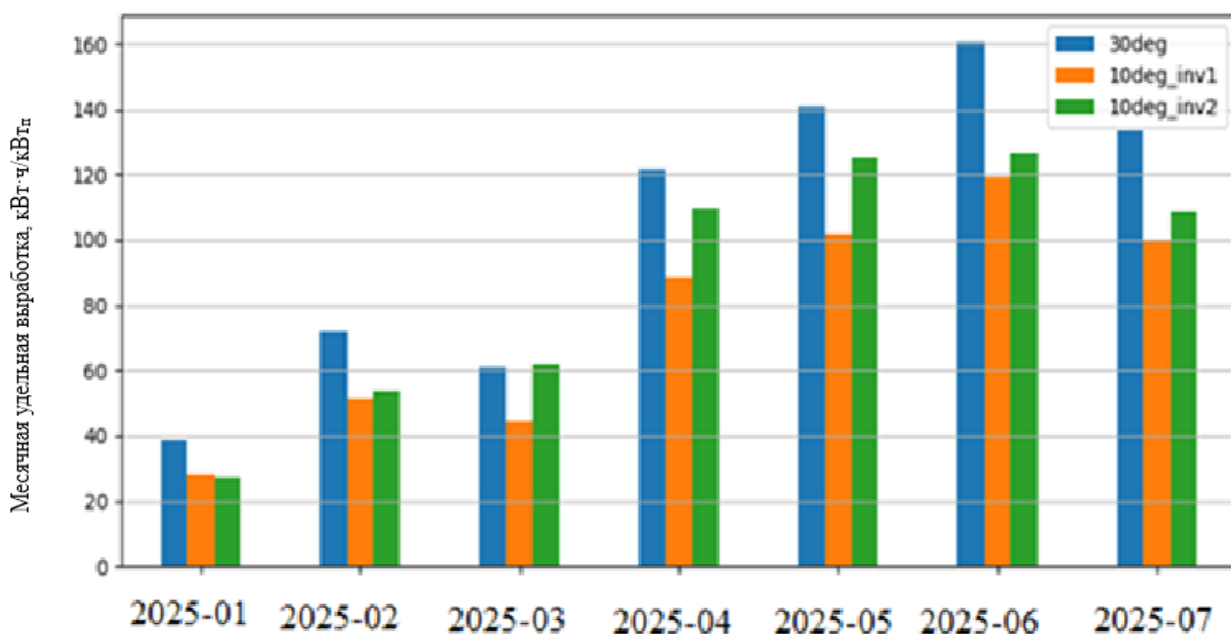


Рисунок 3.11. – Месячная удельная выработка

Среднесуточные профили удельной выработки (Рис. 3.12) наглядно подтверждают выявленную ранее тенденцию. Подсистема с углом наклона  $30^\circ$  демонстрирует более выраженный полуденный максимум, что отражает лучшее соответствие геометрии установки условиям низкого угла возвышения Солнца в зимний период. Обе подсистемы с углом  $10^\circ$  формируют сходные по форме кривые, однако с меньшей амплитудой по сравнению с конфигурацией  $30^\circ$ . Важно отметить, что наблюдаемое локальное снижение выработки у подсистемы  $10^\circ$  (инвертор №2) в полуденные часы не связано с геометрией установки. Данная фотоэлектрическая система функционирует в режиме zero-export (запрет обратной подачи энергии в сеть). В периоды снижения внутреннего электропотребления инвертор принудительно ограничивает генерацию для предотвращения отдачи энергии в сеть. Это приводит к смещению рабочей точки MPPT и явлению вынужденному ограничению генерации (generation curtailment), что визуалью проявляется как провал в почасовом профиле.

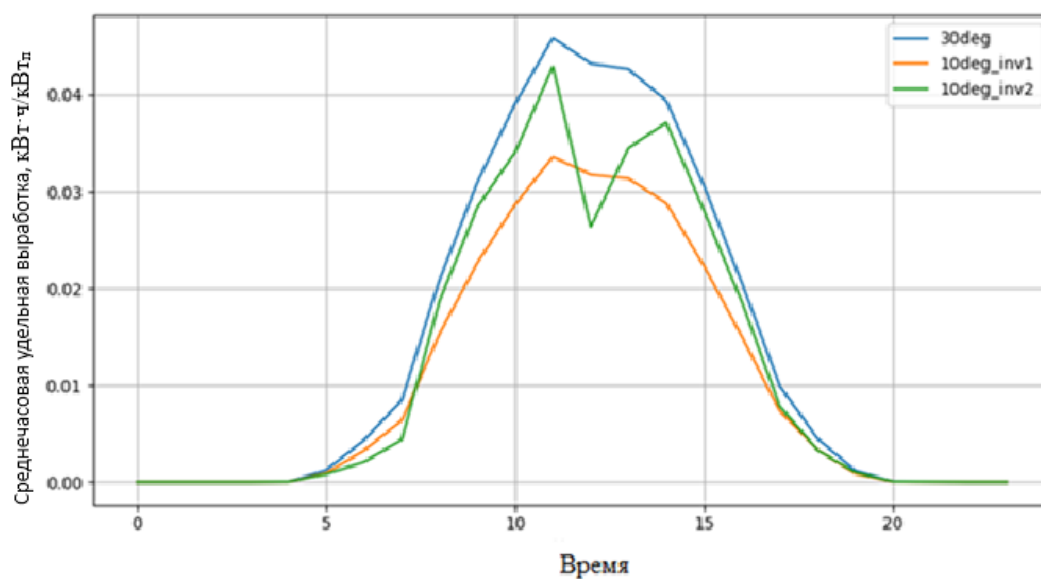


Рисунок 3.12. – Среднесуточный профиль удельной выработки

Почасовые временные ряды нормализованной выработки (Рис. 3.13) дополнительно иллюстрируют относительную производительность трёх подсистем. В зимние месяцы (февраль–март) конфигурация  $30^\circ$  стабильно демонстрирует более высокие значения в течение светового дня, отчётливо отличаясь от обеих подсистем с наклоном  $10^\circ$ . Это подтверждает критическую роль большего угла наклона при малом угле падения солнечного излучения.

Начиная с апреля, по мере увеличения угла возвышения Солнца и роста суммарной инсоляции, различия между конфигурациями постепенно уменьшаются. Подсистема  $10^\circ$  (инвертор №2) в ряде дней приближается к кривой  $30^\circ$ , однако сохраняются кратковременные провалы, обусловленные режимом zero-export. В то же время подсистема  $10^\circ$  (инвертор №1) систематически демонстрирует более низкие значения, что указывает на влияние дополнительных эксплуатационных факторов (конфигурация стрингов, распределение по МРРТ), не связанных с углом наклона [5-А,6-А].

В летние месяцы (июнь–июль) все три подсистемы достигают высокого и стабильного уровня удельной выработки, при этом различия между  $30^\circ$  и  $10^\circ$  становятся менее выраженными. Тем не менее, конфигурация  $30^\circ$  сохраняет устойчивое преимущество на протяжении всего периода наблюдений.

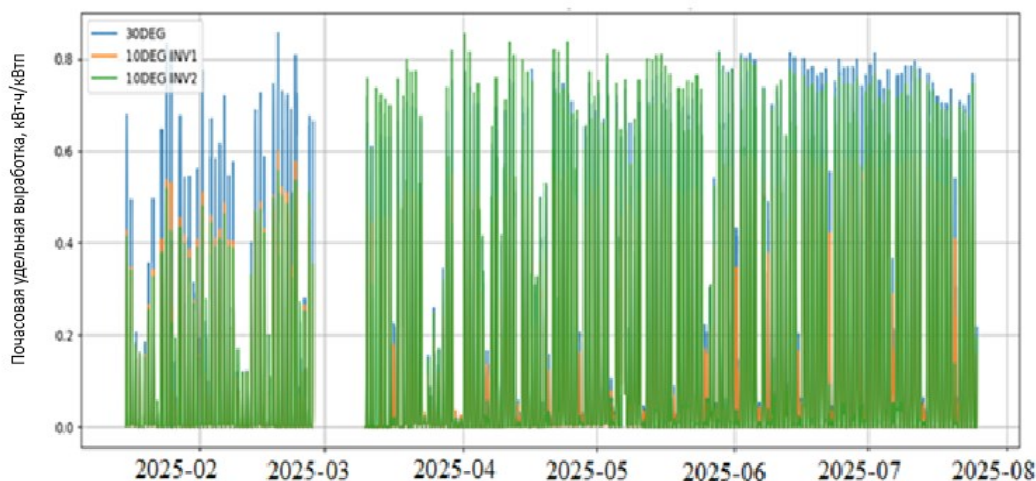


Рисунок 3.13. – Временной ряд почасовой удельной выработки трёх подсистем ( $30^\circ$ ,  $10^\circ$  INV1,  $10^\circ$  INV2)

Применение 24-часового скользящего среднего (Рис. 3.14) позволяет исключить влияние кратковременных метеорологических флуктуаций и эксплуатационных ограничений, выявляя устойчивый тренд. В январе–феврале подсистема  $30^\circ$  стабильно превосходит обе подсистемы  $10^\circ$  примерно на 25–30%. По мере перехода к весенне-летнему периоду разрыв сокращается: подсистема  $10^\circ$  (инвертор №2) периодически приближается к уровню  $30^\circ$ , тогда как подсистема  $10^\circ$  (инвертор №1) остаётся ниже на всём интервале наблюдений. Согласованность поведения двух подсистем с одинаковым углом наклона подтверждает корректность измерений и одновременно подчёркивает устойчивую потерю эффективности при малом наклоне.

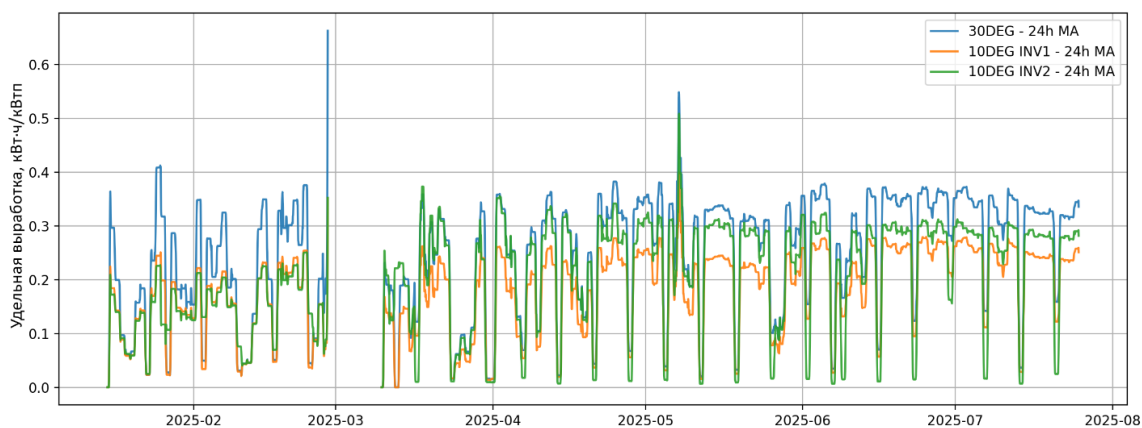


Рисунок 3.14. – Временной ряд 24-часового скользящего среднего удельной выработки трёх подсистем ( $30^\circ$ ,  $10^\circ$  INV1,  $10^\circ$  INV2)

Полученные результаты полностью согласуются с теоретическими представлениями о косинусных потерях: при малом угле возвышения Солнца модули, установленные под более крутым углом, воспринимают большую долю прямого излучения. Наблюдаемое преимущество порядка 25–30% в зимний период соответствует международным исследованиям по оптимизации угла наклона.

Хотя конфигурации с малым углом ( $10^\circ$ ) демонстрируют приемлемую эффективность летом, в зимний период их производительность существенно снижается. Для условий северного Таджикистана, где дефицит электроэнергии наиболее выражен в холодное время года, применение углов наклона порядка  $30^\circ$  имеет принципиальное значение для обеспечения стабильной сезонной генерации.

Сравнение двух независимых подсистем с углом  $10^\circ$  (инверторы №1 и №2) демонстрирует как согласованность сезонной динамики, так и различия, обусловленные эксплуатационными факторами. Несмотря на это, обе подсистемы  $10^\circ$  на всех уровнях временной агрегации (месяц, сутки, час, скользящее среднее) генерируют на 16–28% меньше энергии по сравнению с конфигурацией  $30^\circ$ .

Таким образом, эмпирические данные однозначно подтверждают целесообразность применения более крутых углов наклона ( $\sim 30^\circ$ ) при проектировании крышных фотоэлектрических систем в горных и предгорных регионах Центральной Азии, где оптимизация зимней выработки играет решающую роль.

### **Выводы по главе 3**

1. Пространственно-геоинформационный анализ позволил отобрать 3664 104 здания с пригодной площадью крыши более  $20 \text{ м}^2$ . Совокупный технический потенциал крышных фотоэлектрических систем в Республике Таджикистан составляет 53,97 ГВт установленной мощности и 47,85 млрд кВт·ч расчётной годовой генерации.

2. Детализированное исследование по городу Душанбе показало, что для 3880 зданий суммарная площадь крыш составляет 4,27 км<sup>2</sup>, из которых 3,10 км<sup>2</sup> признаны пригодными для размещения СФЭС (то есть  $\approx 73$  % от базовой площади). Соответствующий технический потенциал оценивается в 310,7 МВт<sub>р</sub> установленной мощности и 447 ГВт·ч годовой выработки при рациональной компоновке панелей.
3. 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  $\Delta$ ПСЭ  $\approx 0,010$  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.
4. 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.
5. 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.

## 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 м<sup>2</sup>. 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 км<sup>2</sup>, из которых 3,10 км<sup>2</sup> 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 применению результатов**

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., 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.

9. Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ. Электроэнергетика государств-участников СНГ за 2014–2024 гг. Москва, 2025.
10. Poignant A. Electricity and female employment: Evidence from Tajikistan's winter energy crisis // *Journal of Development Economics*. 2025. Vol. 172. P. 103383.
11. Fields D., Kochnakyan A., Mukhamedova T., Stuggins G., Besant-Jones J. *Tajikistan's Winter Energy Crisis: Electricity Supply and Demand Alternatives*. Washington, DC: The World Bank, 2013.
12. International Energy Agency (IEA). *Tajikistan 2022: Energy Sector Review*. Paris: IEA Publications, 2022. Report.
13. Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года, Утв. постановлением Маджлиси намояндагон Маджлиси Оли РТ от 01.12.2016 № 636, Душанбе, 146, 2016. [Online]. [https://mewr.tj/wp-content/uploads/files/National%20Development%20Strategy-2030\\_ru.pdf](https://mewr.tj/wp-content/uploads/files/National%20Development%20Strategy-2030_ru.pdf)
14. Петров Г.Н. и др. Общая оценка ситуации в энергетике в мире и Таджикистане // *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук*, No. 2, 2009. pp. 101–111.
15. Чоршанбиев Р.С. Повышение эффективности функционирования электрических сетей с распределённой солнечной генерацией за счёт снижения технических потерь электроэнергии (на примере Республики Таджикистан). Москва: Изд-во МЭИ, 2019.
16. Kudusov M. M., Madvaliev U., Bakhromzod R., Mukumov A. Assessing the Potential of Solar and Wind Energy in Tajikistan Using a Multi-criteria Method // *Vestnik MEI*. - 2024. - No. 6. - P. 55–67. - DOI: 10.24160/1993-6982-2024-6-55-67.
17. Сабуриён М.М. Природные условия и особенности Восточного Таджикистана (Памир) // *Вестник педагогического университета (Естественных наук)*, No. 3-4, 2019. pp. 79-84.

18. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Официальный сайт. URL: <https://www.mewr.tj/> (дата обращения: 24.11.2025).
19. Широкова Т.А., Антипов А. В. Построение трехмерных моделей зданий городских территорий на основе данных воздушного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-trehmernyh-modeley-zdaniy-gorodskih-territoriy-na-osnove-dannyh-vozdushnogo-lazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 11.12.2025).
20. Desthieux G., Carneiro C., Camponovo R., Ineichen P., Morello E., Boulmier A., Abdennadher N., Dervey S., Ellert C. Solar Energy Potential Assessment on Rooftops and Facades in Large Built Environments Based on LiDAR Data, Image Processing, and Cloud Computing. Methodological Background, Application, and Validation in Geneva (Solar Cadaster) // *Frontiers in Built Environment*. - 2018. - Т. 4. - С. 14. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00014.
21. Suomalainen K., Wang V., Sharp B. Rooftop solar based on LiDAR data: Bottom-up assessment at neighbourhood level // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 111. P. 463–475. DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.025.
22. Suri M., Hofierka J. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments // *Transactions in GIS*. 2004. Vol. 8, No. 2. P. 175–190. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x.
23. Jo J. H., Otanicar T. P. A hierarchical methodology for the mesoscale assessment of building integrated roof solar energy systems // *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. P. 2992–3000. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.038.
24. Nguyen H. T., Pearce J. M. Incorporating shading losses in solar photovoltaic potential assessment at the municipal scale // *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 1245–1260. DOI: 10.1016/j.solener.2012.01.017.
25. Nguyen H. T., Pearce J. M. Automated quantification of solar photovoltaic potential in cities // *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2013. Vol. 1. P. 49–60. DOI: 10.14246/irspsd.1.1\_49.

26. Brito M. C., Gomes N., Santos T., Tenedorio J. A. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data // *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 283–288. DOI: 10.1016/j.solener.2011.09.031.
27. Strzalka A., Alam N., Duminil E., Coors V., Eicker U. Large scale integration of photovoltaics in cities // *Applied Energy*. 2012. Vol. 93. P. 413–421. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.033.
28. Boz M. B., Calvert K., Brownson J. R. S. An automated model for rooftop PV systems assessment in ArcGIS using LiDAR // *Energy*. 2015. Vol. 3, No. 3. P. 401–420. DOI: 10.3934/energy.2015.3.401.
29. Gooding J., Crook R., Tomlin A. S. Modelling of roof geometries from low-resolution LiDAR data for city-scale solar energy applications using a neighboring buildings method // *Applied Energy*. 2015. Vol. 148. P. 93–104. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.013.
30. Huang Y., Yu B., Hu Z., Wu J., Wu B. Locating suitable roofs for utilization of solar energy in downtown area using airborne LiDAR data and object-based method: A case study of the Lujiazui region, Shanghai // In: 2012 Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. IEEE. DOI: 10.1109/EORSA.2012.6261192.
31. Latif Z. A., Zaki N. A. M., Salleh S. A. GIS-based estimation of rooftop solar photovoltaic potential using LiDAR // In: 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications. DOI: 10.1109/CSPA.2012.6194755.
32. Lukac N., Zlaus D., Seme S., Zalik B., Stumberger G. Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data // *Applied Energy*. 2013. Vol. 102. P. 803–812. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.08.042.
33. Sreckovic N., Lukac N., Zalik B., Stumberger G. Determining roof surface for the installation of PV systems based on LiDAR data, pyranometer measurements, and distribution network configuration // *Energy*. 2016. Vol. 96. P. 404–414. DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.078.

34. Bill A., Mohajeri N., Scartezzini J.-L. 3D model for solar energy potential on buildings from urban LiDAR data // Eurographics Workshop on Urban Data Modeling and Visualization. 2016. P. 51–56. DOI: 10.2312/udmv.20161420.
35. Environment Agency. LIDAR Composite Digital Surface Model (DSM) - 1 m [Электронный ресурс] // Defra Data Services Platform. - Режим доступа: <https://environment.data.gov.uk/dataset/9ba4d5ac-d596-445a-9056-dae3ddec0178> (дата обращения: 01.12.2025).
36. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. [Название отчёта]. / Sally Jewell (Secretary), Suzette M. Kimball (Acting Director). - Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2015.
37. Gagnon P., Margolis R., Melius J., Phillips C., Elmore R. Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment. - Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016. - Technical Report NREL/TP-6A20-65298.
38. Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A. Applications of 3D City Models: State of the Art Review // ISPRS International Journal of Geo-Information. - 2015. - Vol. 4. - P. 2842–2889. DOI: 10.3390/ijgi4042842.
39. Choi Y., Rayl J., Tammineedi C., Brownson J. R. S. PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic in urban areas // Solar Energy. 2011. Vol. 85. P. 2924–2939. DOI: 10.1016/j.solener.2011.08.034.
40. Boz Z., Biljecki F. Roof form classification using LiDAR and building footprints // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 88. P. 102065.
41. Latif S., Ng S. T., Chen S. City-scale solar energy mapping using LiDAR and 3D morphological analysis: Case of Shanghai // Renewable Energy. 2019. Vol. 143. P. 1503–1517.
42. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. Generating 3D city models without LiDAR // Computers, Environment and Urban Systems. 2016. Vol. 57. P. 210–216.
43. Hubinský, T., Hajtmanek, R., Šeligová, A., Legény, J., & Špaček, R. (2023). Potentials and Limits of Photovoltaic Systems Integration in Historic Urban

- Structures: The Case Study of Monument Reserve in Bratislava, Slovakia. Sustainability, 15(3), 2299. <https://doi.org/10.3390/su15032299>
44. Zhang Deng, Xi Chen, Jingjing Yang, Yixing Chen. Development of urban building energy models in Hong Kong based on open-source datasets // Proceedings of the 18th IBPSA Conference, Shanghai, China, Sept. 4–6, 2023. - P. 2703–2709. - DOI: 10.26868/25222708.2023.1470.
  45. Zhou Q., Kwan M. P., Li H. Assessment of rooftop solar photovoltaic potential of 212,000 buildings using LiDAR data and GIS // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 120. P. 109632. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109632.
  46. ArcGIS CityEngine. Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-cityengine/overview> (дата обращения: 24.11.2025).
  47. QGIS Desktop. URL: <https://www.osgeo.org/projects/qgis/> (дата обращения: 24.11.2025).
  48. QGIS: Open Source Geographic Information System. URL: <https://www.qgis.org/en/site/> (дата обращения: 24.11.2025).
  49. Microsoft Building Footprint Data [Электронный ресурс] // *OpenStreetMap Wiki*. URL: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Microsoft\\_Building\\_Footprint\\_Data](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Microsoft_Building_Footprint_Data) (дата обращения: 16.12.2025).
  50. Zhang Y., Lu C., Wang J., Du F. A large-scale extraction framework for mapping urban informal settlements using remote sensing and semantic segmentation // Geocarto International. - 2024. - Vol. 39, No. 1. - DOI: 10.1080/10106049.2024.2345135.
  51. Mastrucci A., Baume O., Stazi F., Leopold U. Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam // Energy and Buildings. 2014. Vol. 75. P. 358–367. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.032.
  52. Assouline D., Mohajeri N., Scartezzini J.-L. Large-scale rooftop solar photovoltaic potential estimation using Random Forests // Applied Energy. 2018. Vol. 217. P. 189–211. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.118.

53. Nouvel R., Mastrucci A., Leopold U., Baume O., Coors V., Eicker U. Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 107. P. 204–212. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.021.
54. Ma J., Cheng J. C. P. Estimation of the building energy use intensity in the urban scale by integrating GIS and big data technology // *Applied Energy*. 2016. Vol. 183. P. 182–192. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.079.
55. Machine Learning in ArcGIS. Esri. URL: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/machine-learning-in-arcgis/> (дата обращения: 24.11.2025).
56. Quan S. J., Li Q., Augenbroe G., Brown J., Yang P. P.-J. A GIS-based energy balance modeling system for urban solar buildings // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 2946–2952. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.598.
57. Nageler P., Zahrer G., Heimrath R., Mach T., Mauthner F., Leusbrock I., et al. Novel validated method for GIS-based automated dynamic urban building energy simulations // *Energy*. 2017. Vol. 139, No. 15. P. 142–154. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.151. Ruiz-Arias J.A. SPARTA: Solar parameterization for the radiative transfer of the cloudless atmosphere // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 188, 2023.
58. Thai C., Brouwer J. Challenges estimating distributed solar potential with utilization factors: California universities case study // *Applied Energy*. 2021. Vol. 282. P. 116209. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116209.
59. Maliva R. G. Geostatistical methods and applications // In: *Aquifer Characterization Techniques*. Springer Hydrogeology. Cham: Springer, 2016. P. 595–617. DOI: 10.1007/978-3-319-32137-0\_20.
60. Assouline D., Mohajeri N., Scartezzini J.-L. Estimation of large-scale solar rooftop PV potential for smart grid integration: A methodological review // In: *Sustainable Interdependent Networks*. Springer, 2018. Vol. 145. P. 173–219. DOI: 10.1007/978-3-319-74412-4\_11.

61. Webster R., Oliver M. A. Local estimation or prediction: Kriging // In: Geostatistics for Environmental Scientists. 2nd ed. Statistics for Social Sciences. Wiley, 2007. P. 1–315. URL: <https://www.wiley.com/en-kr/Geostatistics+for+Environmental+Scientists%2C+2nd+Edition-p-9780470028582>
62. Kanevski M., Timonin V., Pozdnukhov A. Machine Learning for Spatial Environmental Data: Theory, Applications, and Software. EPFL Press, 2009. DOI: 10.1201/9781439808085.
63. Geostatistics, Kriging in Geostatistical Analyst. ArcGIS Desktop. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm> (дата обращения: 24.11.2025).
64. Hong T., Koo C., Park K., Park H. A GIS-based optimization model for estimating the electricity generation of rooftop PV systems // Energy. 2014. Vol. 65. P. 190–199. DOI: 10.1016/j.energy.2013.11.082.
65. D’Agostino V., Zelenka A. Supplementing solar radiation network data by co-kriging with satellite images // International Journal of Climatology. 1992. Vol. 12. P. 749–761. DOI: 10.1002/joc.3370120707.
66. Alsamamra H., Ruiz-Arias J.-A., Pozo-Vazquez D., Tovar-Pescador J. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain // Agricultural and Forest Meteorology. 2009. Vol. 149. P. 1343–1357. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.03.005.
67. Moreno A., Gilabert M. A., Martinez B. Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches // Solar Energy. 2011. Vol. 85. P. 2072–2084. DOI: 10.1016/j.solener.2011.05.017.
68. Fathizad H., Mobin M. H., Gholamnia A., Sodaiezhadeh H. Modeling and mapping of solar radiation using geostatistical analysis methods in Iran // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10, No. 391. P. 1–13. DOI: 10.1007/s12517-017-3130-x.

69. Bertrand C., Housmans C., Leloux J., Journee M. Solar irradiation from the energy production of residential PV systems // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 125. P. 306–318. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.036.
70. Koo C., Hong T., Jeong K., Ban C., Oh J. Development of the smart photovoltaic system blind and its impact on net-zero energy solar buildings using technical-economic-political analysis // *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 382–396. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.088.
71. McKenney D. W., Pelland S., Poissant Y., Morris R., Hutchinson M., Papadopol P., et al. Spatial insolation models for photovoltaic energy in Canada // *Solar Energy*. 2008. Vol. 82. P. 1049–1061. DOI: 10.1016/j.solener.2008.04.008.
72. Wang L. Z., Tan H. W., Ji L., Wang D. A method for evaluating photovoltaic potential in China based on GIS platform // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 93. P. 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/93/1/012056.
73. Rehman S., Ghori S. G. Spatial estimation of global solar radiation using geostatistics // *Renewable Energy*. 2000. Vol. 21. P. 583–605. DOI: 10.1016/S0960-1481(00)00078-1.
74. OpenStreetMap [Электронный ресурс] // Википедия - свободная энциклопедия. - URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap> (дата обращения: 16.12.2025).
75. Oostwegel L. J. N., Schorlemmer D., Guéguen P. From Footprints to Functions: A Comprehensive Global and Semantic Building Footprint Dataset // *Scientific Data*. - 2025. - Vol. 12. - Article 1699. - DOI: 10.1038/s41597-025-06132-z.
76. Lee M., Koo C., Hong T., Park H. S. Framework for mapping monthly average daily solar radiation using advanced case-based reasoning and a geostatistical technique // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 48, No. 8. P. 4604–4612. DOI: 10.1021/es405293u.

77. Mishra T., Rabha A., Kumar U., Arunachalam K., Sridhar V. Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and GIS // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. Vol. 19. P. 100370. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100370.
78. Geostatistical Analyst, ArcMap, ArcGIS. Classification trees of the interpolation methods offered in Geostatistical Analyst. URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/classification-trees-of-the-interpolation-methods-offered-in-geostatistical-analyst.htm> (дата обращения: 24.11.2025).
79. Aydin N. Y., Kentel E., Duzgun H. S. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 70. P. 90–106. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.004.
80. Amjad F., Shah L. A. Identification and assessment of sites for solar farms development using GIS and density-based clustering technique: A case of Pakistan // Renewable Energy. 2020. Vol. 155. P. 761–769. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.083.
81. Zhang Y., Ren J., Pu Y., Wang P. Solar energy potential assessment: A framework integrating geographic, technological, and economic indices // Renewable Energy. 2020. Vol. 149. P. 577–586. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.071.
82. Tro-Cabrera A., Lago-Aurrekoetxea R., Martínez-de-Alegría I., Villamor E., Campos-Celador A. A methodology for assessing rooftop solar photovoltaic potential using GIS open-source software and the EROI constraint // Energy and Buildings. - 2025. - Article 115401. - DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115401. 63-73
83. Izquierdo S., Montañés C., Dopazo C., Fueyo N. Roof-top solar energy potential under performance-based building energy codes: The case of Spain // Solar Energy. - 2011. - Vol. 85, No. 1. - P. 208–213. - DOI: 10.1016/j.solener.2010.11.003.

84. Bhandari K. P., Collier J. M., Ellingson R. J., Apul D. S. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: a systematic review and meta-analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2015. - Vol. 47. - P. 133–141. - DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.057.
85. Lukač N., Spelič D., Štumberger G., Žalik B. Optimisation for large-scale photovoltaic arrays' placement based on Light Detection And Ranging data // *Applied Energy*. - 2020. - Vol. 263. - Article 114592. - DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114592.
86. Dupont E., Koppelaar R., Jeanmart H. Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints // *Applied Energy*. - 2020. - Vol. 257. - Article 113968. - DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113968.
87. 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, No. 10. - P. 929–939. - DOI: 10.1016/j.solener.2008.03.007.
88. Lukač N., Seme S., Zlaus D., Štumberger G., Žalik B. Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data // *Energy*. - 2014. - Vol. 66. - P. 598–609. - DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.066.
89. Carrion J. A., Estrella E., Aznar Dols F., Ramos Ridao A. The electricity production capacity of photovoltaic power plants and site selection in Andalusia (Spain) // *Renewable Energy*. 2008. Vol. 33. P. 545–552. DOI: 10.1016/j.renene.2007.05.041.
90. Quiros E., Pozo M., Ceballos J. Solar potential of rooftops in Caceres city, Spain // *Journal of Maps*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 44–51. DOI: 10.1080/17445647.2018.1456487.
91. Ruiz-Arias J.A., Gueymard C.A. GISPLIT: High-performance global solar irradiance component-separation model dynamically constrained by 1-min sky conditions // *Solar Energy*, Vol. 269, 2024.

92. Na T., Noh J., Kim H., Kang S.-S. Analysis of Climate, Weather, Solar Radiation and Solar Energy in Major Cities of Tajikistan // Journal of the Korean Society of Engineering Geology, Vol. 33, No. 3, 2023. pp. 389–401.
93. Global Solar Atlas 2.0 [Электронный ресурс] // Solar Resource Data. The World Bank Group and Solargis: [сайт]. [2019]. URL: <https://globalsolaratlas.info> (дата обращения: 05.05.2025).
94. Beyer H.G., Costanzo C., Heinemann D. Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images // Solar Energy, Vol. 56, No. 3, 1996. pp. 207–212.
95. Dürr B., Zelenka A. Deriving surface global irradiance over the Alpine region from Meteosat second generation data by supplementing the Heliosat method // International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 21, 2009. pp. 5821–5841.
96. Rigollier C., Lefèvre M., Wald L. The method Heliosat 2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images // Solar Energy, Vol. 77, No. 2, 2004. pp. 159–169.
97. Schroedter Homscheidt M., Betcke J., Breitkreuz H. et al. Energy-specific solar radiation data from MSG: the Heliosat 3 project // Proceedings of the 3rd MSG RAO Workshop. Helsinki. 2006. Vol. ESA SP 619. pp. 52–57.
98. Müller R., Pfeifroth U., Träger Chatterjee C. et al. (2015). Surface solar radiation data set – Heliosat-based, CM SAF - Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). 2015.
99. Sengupta M. et al. The National Solar Radiation Data Base (NSRDB) NREL Report No. TP-5D00-67722. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2018.
100. Bird R.E., Hulstrom R.L. A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. // Golden, CO: Solar Energy Research Institute (SERI), 1981. pp. 642-761.
101. C. G. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data // Solar Energy, Vol. 51, No. 2, 1993. pp. 121–138.

102. C.A. G. REST2: High-precision spectral model for broadband clear-sky irradiance computation and its validation against high-quality measurements // Solar Energy, Vol. 82, No. 3, 2008. pp. 272–285.
103. Gueymard C.A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part 1: Detailed theoretical performance assessment // Solar Energy, Vol. 74, 2004. pp. 355–379.
104. Gueymard C.A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part 2: Validation with high quality measurements // Solar Energy, Vol. 74, 2004. pp. 381–395.
105. Validation Report: Global Solar Atlas 2.0. Solar resource data. WB/ESMAP, 2019.
106. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Meteosat second generation (MSG). 2000. URL: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2000/12132-meteosat-second-generation-msg.pdf>
107. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [Электронный ресурс] // “GOES-R Series,” GOES-R Program: [сайт]. URL: <https://www.goes-r.gov/> (дата обращения: 12.08.2025).
108. Bessho K., Date K., Hayashi M. et al. An Introduction to Himawari-8/9 // Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 94, No. 2, 2016. pp. 151–183.
109. C.A. G. SMARTS2.9.5 User’s Guide. NREL & Solar Consulting Services. 2017.
110. Ruiz-Arias J.A. et al. SPARTA: a fast parameterization of broadband irradiance transmittance for clear-sky conditions // Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 188, 2023.
111. Ruiz-Arias J.A., Lara-Fanego V., Santos-Alamillos F., Pozo-Vázquez D., Gueymard C. SPARTA: An efficient parametric model for the assessment of solar irradiance under clear-sky conditions // Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 108, 2019. pp. 38–52.

112. Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., Menicucci D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces // *Solar Energy*, Vol. 39, No. 3, 1987. pp. 221–231.
113. Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation // *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, 1982. pp. 293–302.
114. Reindl D.T., Beckmann W.A., Duffie J.A.. Diffuse fraction correlations, and Evaluation of hourly tilted surface radiation models // *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, 1990. pp. 1-17.
115. Ruiz-Arias J.A., Gueymard C.A. GISPLIT: High-performance global solar irradiance component-separation model dynamically constrained by 1-min sky conditions // *Solar Energy*, Vol. 269, 2024.
116. Goodwin C. et al. Ground based validation of aerosol optical depth from CAMS reanalysis: implications for DNI under clear sky // *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 21, 2021. pp. 1–20.
117. Solargis solar resource database: Validation of satellite-based solar radiation model. Bratislava: Solargis, 2024.
118. Solar Model Validation Report: Regional adaptation of Solargis model based on data acquired in 24-months solar measurement campaign, Republic of Zambia. - Report No. 128-08/2019. - Bratislava: Solargis s.r.o., 2019. - World Bank, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
119. Che H. et al. Evaluation and comparison of MERRA 2 AOD and DAOD with MODIS DeepBlue and AERONET data in Australia // *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 4, 2021. P. 821.
120. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, No. 730, 2020. pp. 1999–2049.
121. Jahangiri M., Nematollahi O., Saghaei H., Haghani A. Using GIS Maps to Assessing Wind Energy in Asian Countries: Finding the High Potential Countries and Examining Their Current Status and Outlook // *Iranica Journal of Energy and*

- Environment. - 2024. - Vol. 15, No. 4. - P. 428–443. DOI: 10.5829/ijee.2024.15.04.10.
122. Goodrich A., James T., Woodhouse M. Residential, commercial, and utility-scale photovoltaic (PV) system prices in the United States: Current drivers and cost-reduction opportunities. NREL, Report No. NREL/TP-6A20-53347., 2012.
123. Kausika B. Calibration and Validation of ArcGIS Solar Radiation Tool for Photovoltaic Potential Determination in the Netherlands // *Energies*. - 2021. - Vol. 14. - Article 1865. DOI: 10.3390/en14071865.
124. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower System Modeling with HOMER // In: *Integration of Alternative Sources of Energy*. - Wiley, 2006. - P. 379–418.
125. Mallick J., Ibnatiq A.A., Kahla N.B., Alqadhi S., Singh V.P., Hoa P.V., Hang H.T., Hong N.V., Le H.A. GIS-Based Decision Support System for Safe and Sustainable Building Construction Site in a Mountainous Region // *Sustainability*. - 2022. - Vol. 14. - Art. 888. DOI: 10.3390/su14020888.
126. Polo J., García R.J. Solar Potential Uncertainty in Building Rooftops as a Function of Digital Surface Model Accuracy // *Remote Sensing*. - 2023. - Vol. 15, No. 3. - Article 567. DOI: 10.3390/rs15030567.
127. Szabó S. et al. Energy solutions in rural Africa: mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension // *Environmental Research Letters*., Vol. 6, No. 3, 2011.
128. 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.
129. Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP): A case study in Konya, Turkey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 28. P. 11–17.
130. Gacu C. J., Ocon J. D., Biona J. B., Santos G. B. Solar farm site suitability assessment using analytic hierarchy process and geographic information system:

- Case of Sibuyan Island, Philippines // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 204. P. 1–15.
131. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey // *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 703–726.
132. Mendas A., Delali A. Integration of GIS and multicriteria decision-making methods in renewable energy planning // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 1187–1204.
133. Rehman S., Sajjad U., Shafiq F. Application of GIS and AHP for renewable energy potential mapping: A comprehensive review // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 4090–4105.
134. Denholm P., Margolis R. *Supply Curves for Rooftop Solar PV-Generated Electricity for the United States*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
135. Lukač N., Seme S., Žlaus D., Štumberger G., Željko V. Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data // *Applied Energy*. 2013. Vol. 102. P. 803–812. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.08.042.
136. Mallinis G., Karteris M., Theodoridou I., Tsioukas V., Karteris M. Development of a nationwide approach for large-scale estimation of green roof retrofitting areas and rooftop solar energy potential using VHR natural colour orthoimagery and DSM data over Thessaloniki, Greece // *Remote Sensing Letters*. 2014. Vol. 5, No. 6. P. 548–557.
137. IRENA. *Renewable power generation costs in 2024*. - Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### I. 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.

### II. Статьи, опубликованные в других изданиях, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики Таджикистан:

[2-A] **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-A] **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-A] **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

### III. Список опубликованных работ в материалах международных конференций:

[5-A] **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 руфтоб-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.



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «МЕХАНСОЗ»  
Тоҳиров Р.С.

11. 2025 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

На основании материалов диссертационной работы выполнено внедрение гибридной СФУ на объекте, расположенном по адресу: г. Душанбе, ул. Пушкина, 51/53. Проект разработан и реализован с целью обеспечения электроснабжения критически важных инженерных систем 12-этажного жилого здания, включая лифт, освещение подъездов и насос для подачи воды на верхние этажи. При проектировании и расчётах были использованы методические подходы, изложенные в диссертации, с учётом ориентации кровли, угла наклона фотомодулей и прогнозируемой солнечной генерации.

Внедрённая система включает: солнечные панели суммарной мощностью 15 кВт (24 модуля по 0,62 кВт), 4 инвертора SRNE мощностью по 12,5 кВт и комплект литий-ионных аккумуляторов (7 шт.) общей ёмкостью 70 кВт·ч.

В ходе внедрения выполнены работы по монтажу оборудования, подключению инверторной части, установке аккумуляторной батареи, наладке системы, пробному пуску и тестированию под расчётные нагрузки.

По итогам проверки установлено, что фотоэлектрическая станция функционирует в штатном режиме, соответствует расчётным параметрам и обеспечивает заданные функции. Замечаний по работе оборудования не выявлено. Система рекомендована к постоянной эксплуатации.

Главный инженер ООО «Меҳансоз» Асоев М.



---

Адрес: Республика Таджикистан, Согдийская область, город Худжанд, СЭЗ «Сугд»  
Тел.: +992 92 714 60 00 ; [www.kedr-a.ru](http://www.kedr-a.ru) E-mail: [dp-fortuna@mail.ru](mailto:dp-fortuna@mail.ru) ИНН 510034385

---

Сод. № 82

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ДП ФОРТУНА-КО»  
Очил И. Амвирзон Дадоевич  
«04» Июль 2025г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научных исследований в производственно-техническую деятельность предприятия

Заказчик — ООО «ДП ФОРТУНА-КО», расположенное по адресу: Республика Таджикистан, г. Худжанд, 3-ий микрорайон, Свободная экономическая зона «Сугд»,

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований, выполненных по теме «Оценка эффективности крышных фотоэлектрических систем на основе геоинформационной системы в условиях Таджикистана», проведённых младшим научным сотрудником Физико-технического института им. С.У.Умарова Национальной академии наук Таджикистана Махмудзода Бехруз Нозир были внедрены в деятельность ООО «ДП ФОРТУНА-КО» при разработке и реализации проекта солнечной электростанции.

1. **Виды внедряемых результатов:** применены методы геоинформационного анализа ориентации, уклона и полезной площади кровли, расчёта затенённости и сезонной инсоляции, а также методики технико-экономической оценки эффективности солнечных фотоэлектрических систем для обоснования параметров станции.
2. **Форма внедрения:** на объекте ООО «ДП ФОРТУНА-КО» выполнены работы по установке и вводу в эксплуатацию сетевой солнечной фотоэлектрической системы мощностью 218 кВт. Проект разработан на основе расчётов, выполненных в диссертации, с учётом ориентации крыши, угла наклона модулей, предполагаемой генерации солнечной энергии и распределения внутренних нагрузок предприятия
3. **Эффективность практической реализации:** внедрение разработанных методик обеспечило повышение точности инженерных расчётов, оптимизацию конфигурации фотоэлектрической системы, обоснованный выбор оборудования и улучшение энергетической эффективности основных технологических процессов предприятия.

Факт практического использования результатов научных исследований подтверждаем:

Главный инженер:  Муминов И.