

ТЕХНИЧЕСКИЕ СОВЕЩАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОСТИ И СОЛНЕЧНОМУ ВОДОНАГРЕВАНИЮ

12 ноября 2025

Гостиница Hyatt Regency, Душанбе

**Оценка солнечного потенциала крыш в Таджикистане
(Фотоэлектрические установки и солнечные водонагреватели)**

Мансур Кудусов, Старший эксперт по энергетике
Дариус Краучюнас, Руководитель рабочей группы

При оценке целесообразности применения фотоэлектрических панелей (solar photovoltaic panels) на строительных конструкциях, например, крышах, следует учитывать пять основных принципов

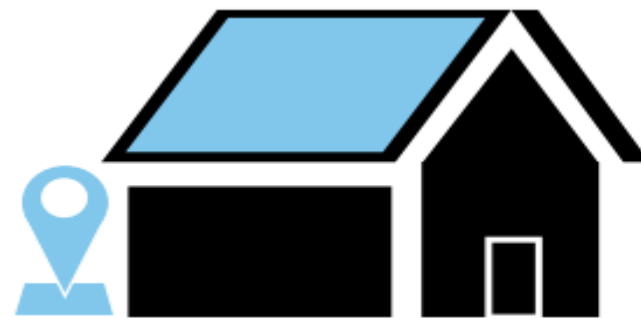
- **Во-первых**, следует оценить общую площадь, доступную на крышах зданий.
- **Второй** принцип заключается в том, что необходимо рассчитать общую площадь, подходящую для установки фотоэлектрических панелей на крыше.
- **Третий** принцип заключается в том, что следует оценить солнечную радиацию, доступную на крышах зданий.
- **Четвертый** и **пятый** принципы связаны с техническими и экономическими аспектами, то есть с общим объемом полезного производства электроэнергии интегрированными солнечными панелями на крыше и соответствующими инвестиционными затратами, соответственно.



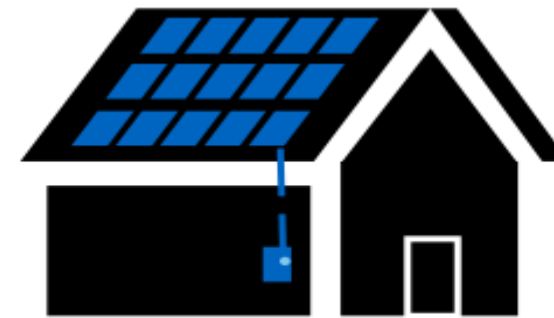
**Физический
потенциал**



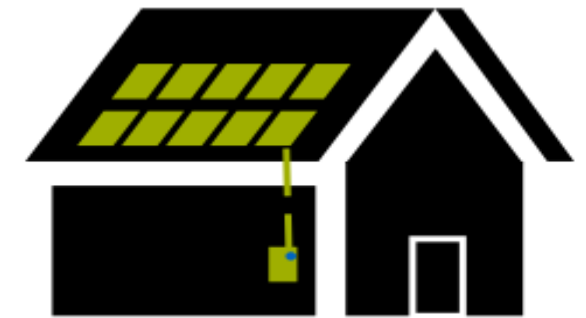
**Географический
потенциал**

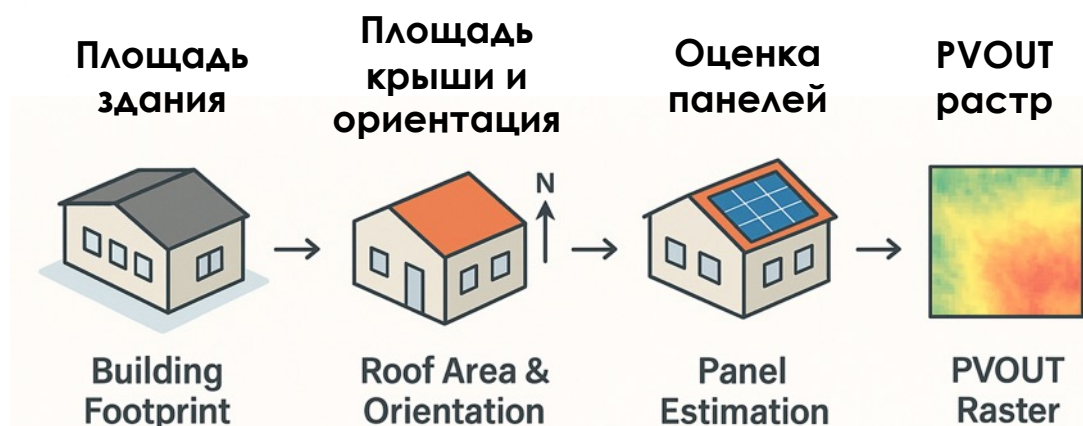
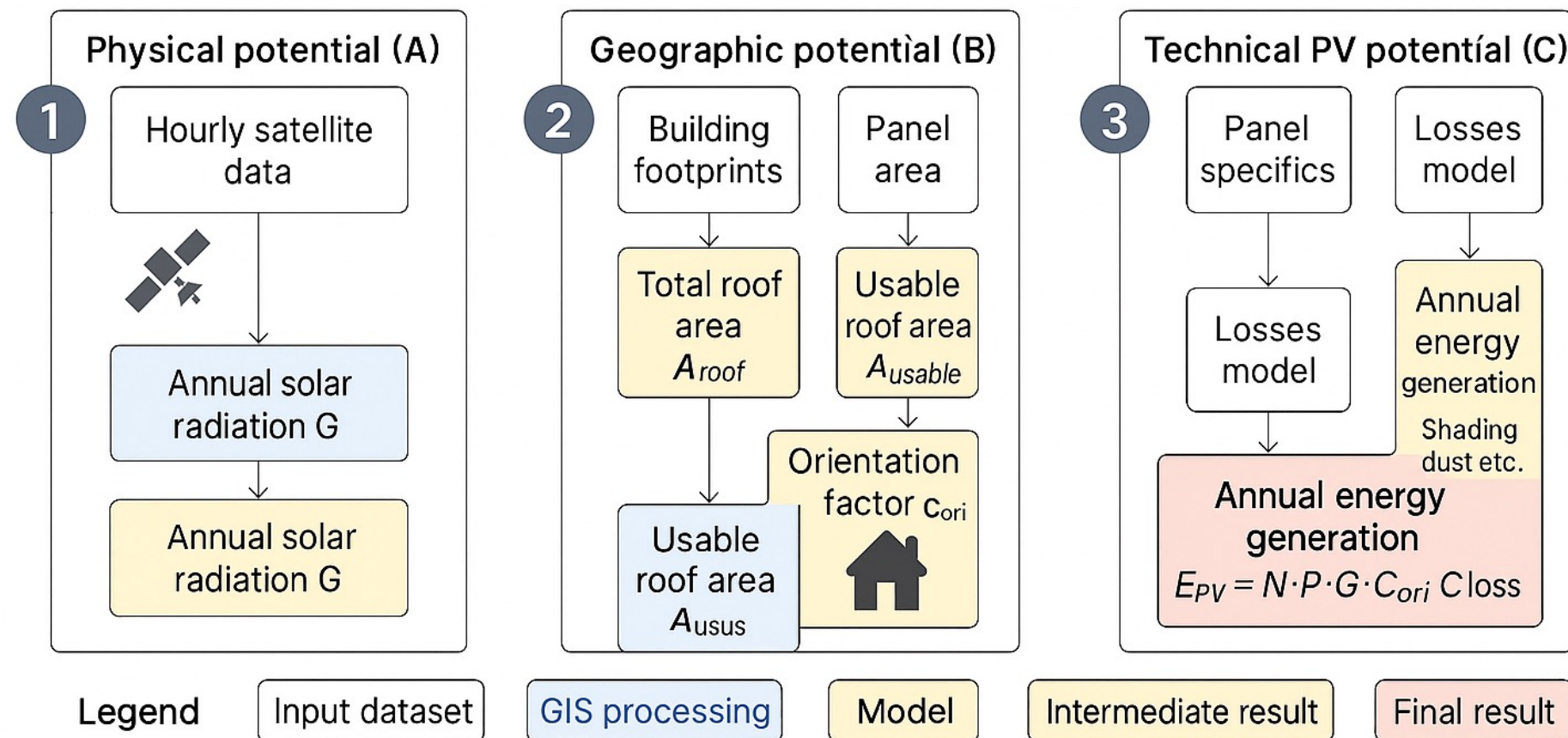


**Технический
потенциал**



**Экономический
потенциал**





Входные данные

ГИС-обработка

Модель

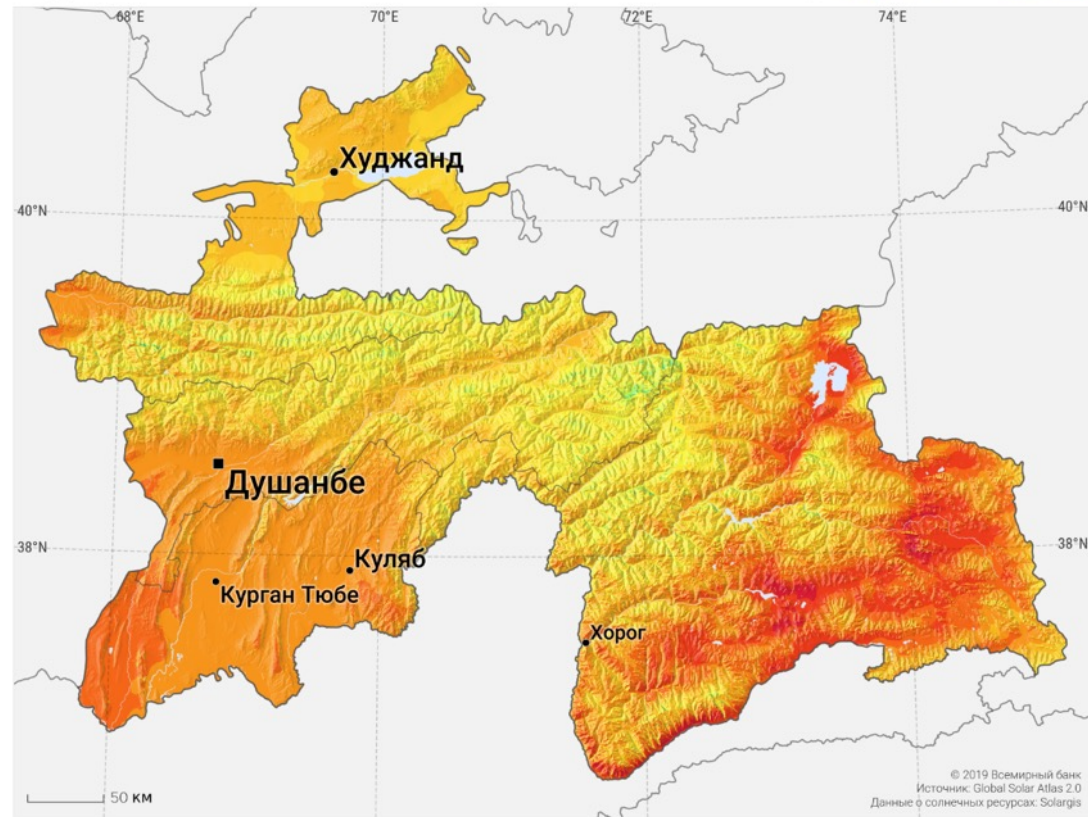
Промежуточный результат

Окончательный результат

Приложение 2 содержит **подробное описание методологии** оценки технического и экономического потенциала

КАРТА СОЛНЕЧНЫХ РЕСУРСОВ

**СУММАРНАЯ СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ
НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ
ТАДЖИКИСТАН**



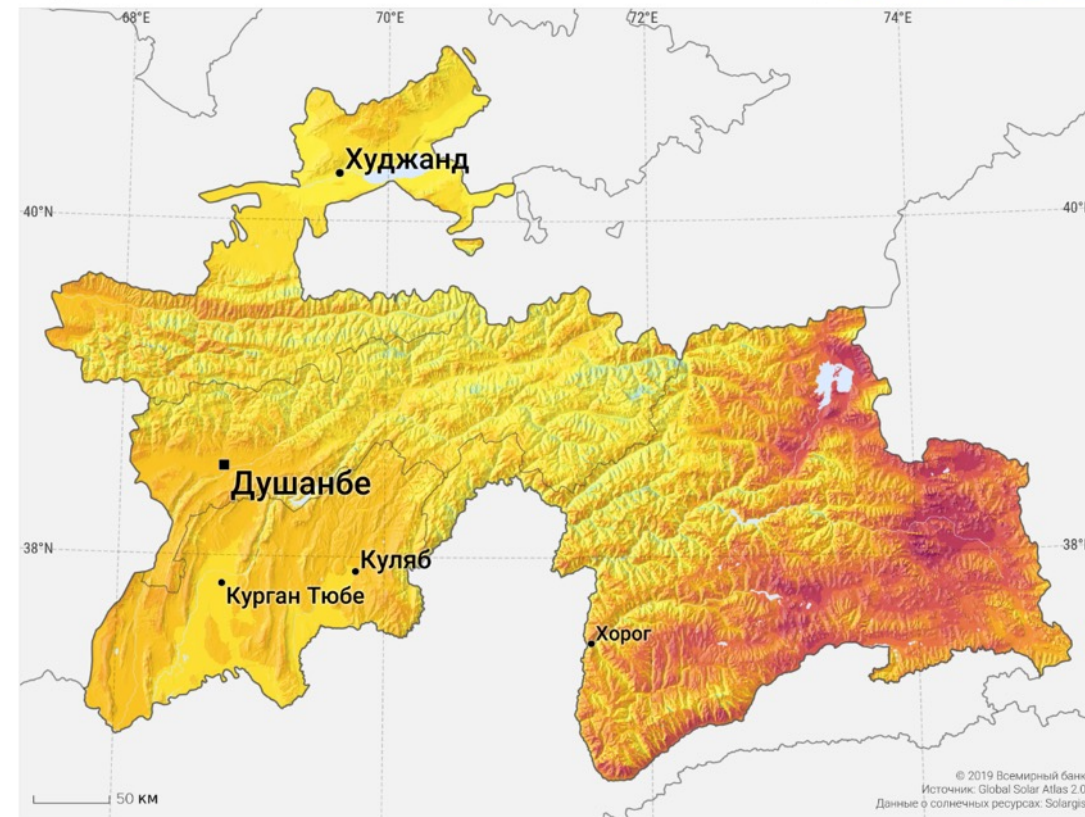
Средняя долгосрочная суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, период 1999-2018 г.

Суммарные дневные значения: 3.2 3.6 4.0 4.4 4.8 5.2
Суммарные годовые значения: 1168 1314 1461 1607 1753 1899 кВт·ч/м²

Карта опубликована Группой Всемирного банка при финансовой поддержке ESMAP, подготовлена организацией Solargis. Более подробную информацию и условия использования см. на веб-сайте <http://globalsolaratlas.info>

КАРТА СОЛНЕЧНЫХ РЕСУРСОВ

**ПОТЕНЦИАЛ ПРОИЗВОДСТВА
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ТАДЖИКИСТАН**



Средний долгосрочный потенциал производства фотоэлектрической энергии, период 1999-2018 г.

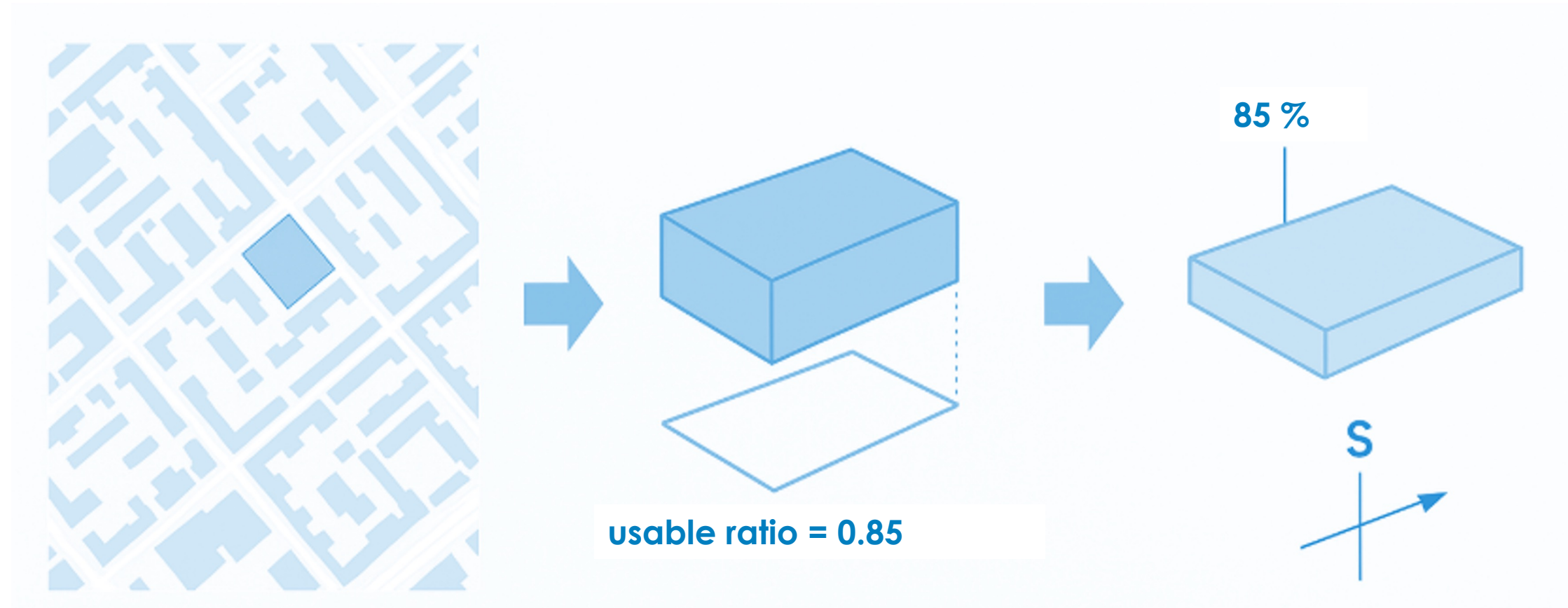
Суммарные дневные значения: 2.8 3.2 3.6 4.0 4.4 4.8 5.2 5.6
Суммарные годовые значения: 1022 1168 1314 1461 1607 1753 1899 2045 кВт·ч/кВт-п

Карта опубликована Группой Всемирного банка при финансовой поддержке ESMAP, подготовлена организацией Solargis. Более подробную информацию и условия использования см. на веб-сайте <http://globalsolaratlas.info>



Физический потенциал





Географический
потенциал



Контуры зданий
(набор данных Microsoft)

Общая площадь крыши
(коэффициент полезного
использования = 0.85)

Полезная площадь крыши и
ориентация здания

Распределение полезной площади крыш и количества зданий по регионам

Регион	Полезная площадь, (м2)	Количество зданий
г. Душанбе	29,455,844	191,261
Районы республиканского подчинения	136,354,229	1,053,914
Согдийская область	180,635,049	1,263,690
Хатлонская область	137,980,837	1,138,296
Горно-Бадахшанская автономная область	2,415,521	16,943
Всего	486,841,480	3,664,104

Карта площадей крыш



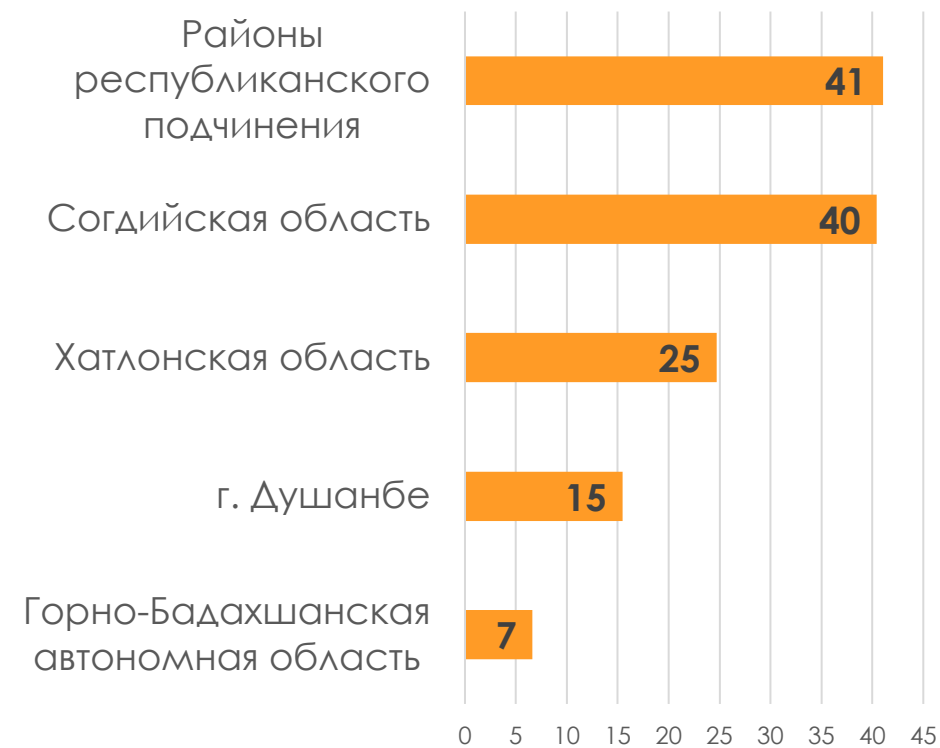
Географический потенциал



Средняя полезная площадь крыши (м2)

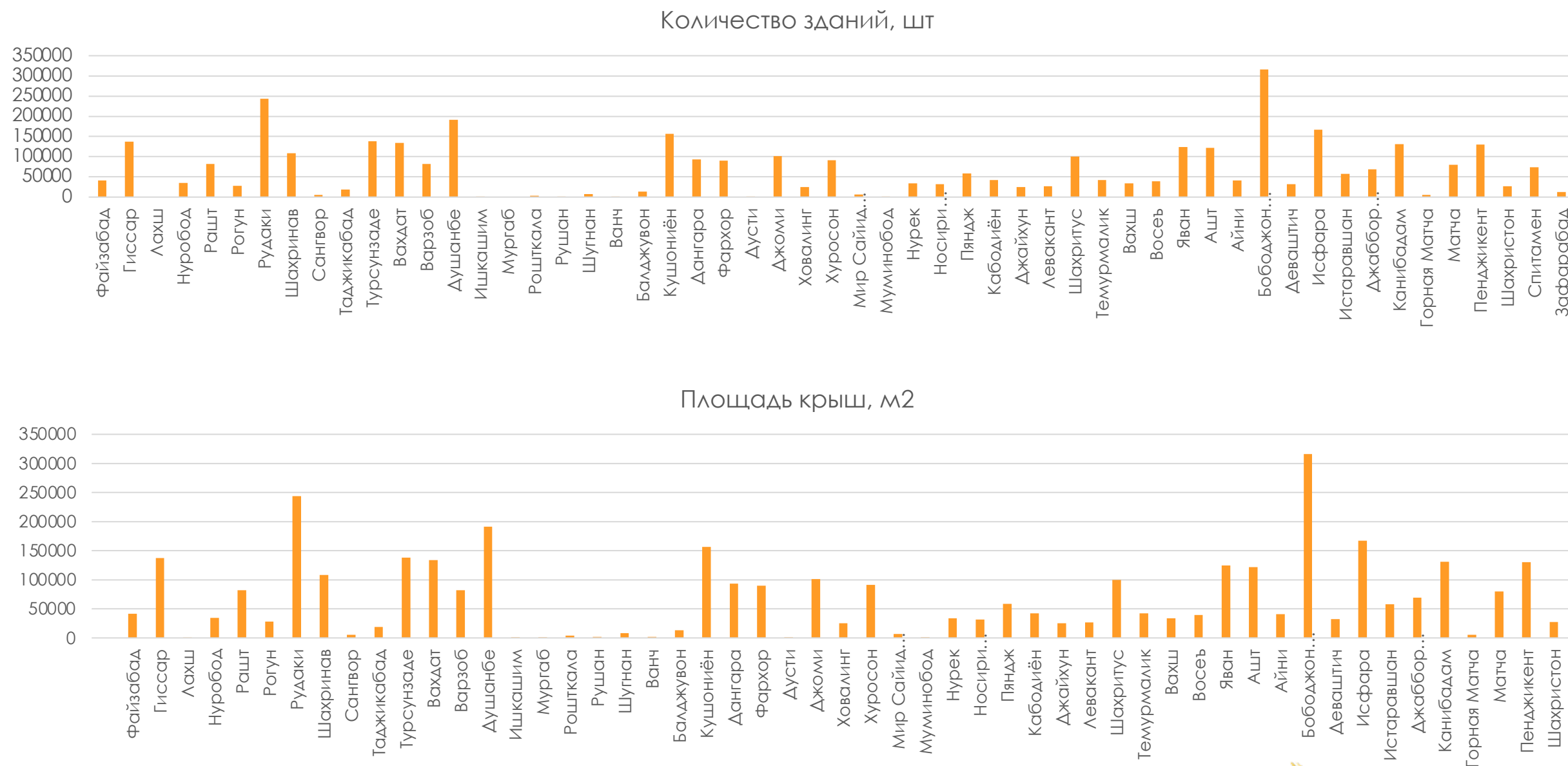


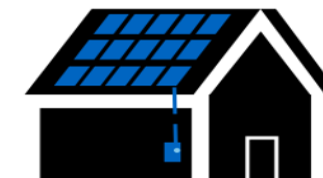
Общая площадь крыш на человека (м2/человек)



Географический потенциал







Характеристики панелей

- Мощность (P , кВт)
- Размеры (Длина $\times$ Ширина, наклон = 30°)

Расчёт площади панелей (с учётом наклона)



Расчёт установки

Расчёт генерации энергии

Ежегодная генерация энергии
(E_{PV} , кВтч/год)

$$E_{PV} = N \times P \times PV_{OUT} \times C_{ори}$$

E_{PV} = ежегодная генерация энергии

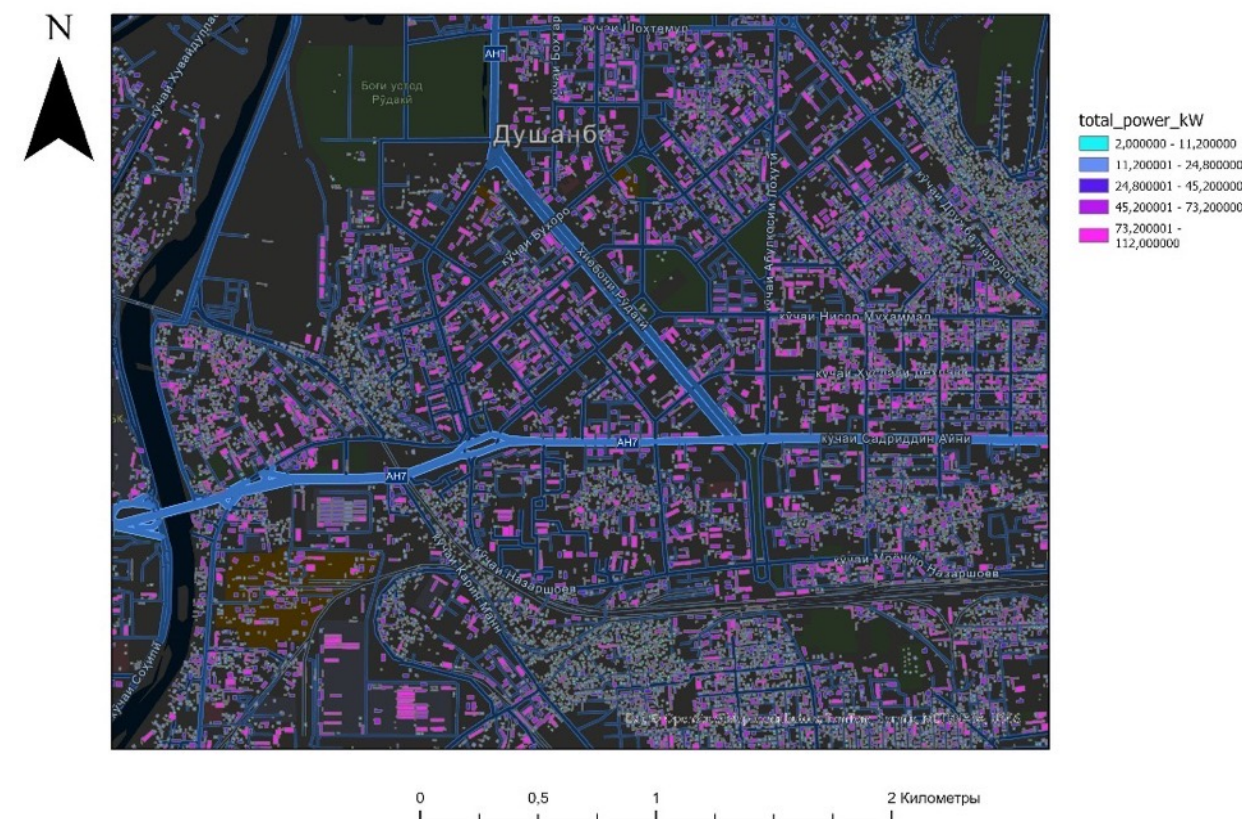
N = число солнечных панелей

P = мощность одной панели (кВт)

PV_{out} = ежегодная солнечная радиация (кВтч/м²/год)

$C_{ори}$ = коэффициент ориентации
(оптимальное выравнивание по азимуту)

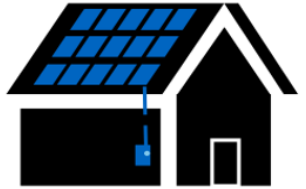
Карта установленных мощностей



Карта годовой генерации



Технический
потенциал



Распределение общей мощности и годовой генерации

Регион	Общая мощность, ГВт	Годовая генерация, ГВт*ч год
Районы республиканского подчинения	15,11	13774,92
г. Душанбе	3,27	3028,848
Горно-Бадахшанская автономная область	0,27	236,1535
Хатлонская область	15,28	13628,85
Согдийская область	20,05	17182,05
Итого	53,97	47850,81



Технический
потенциал

54 ГВт



Оценочная генерация

47.8 ТВт ч



Полезная площадь
крыш

307 км²



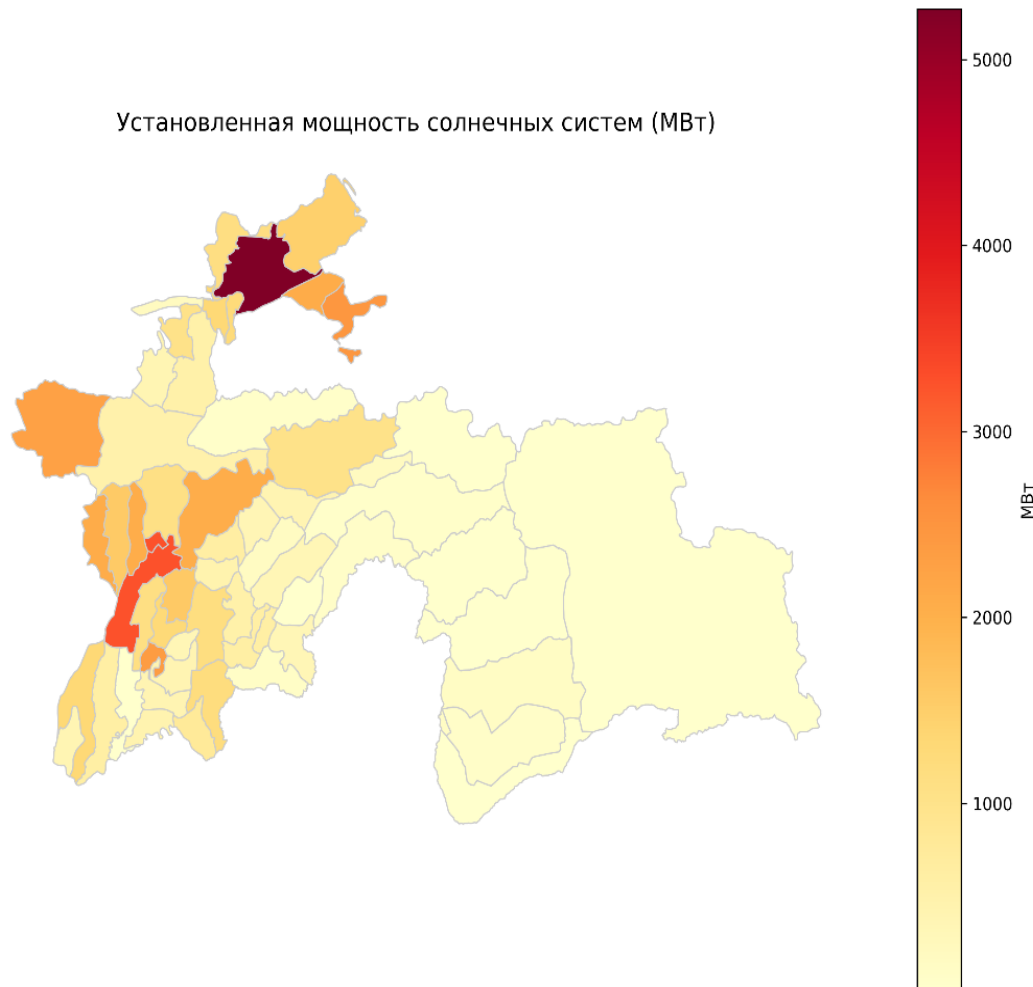
Количество зданий

3 664 104

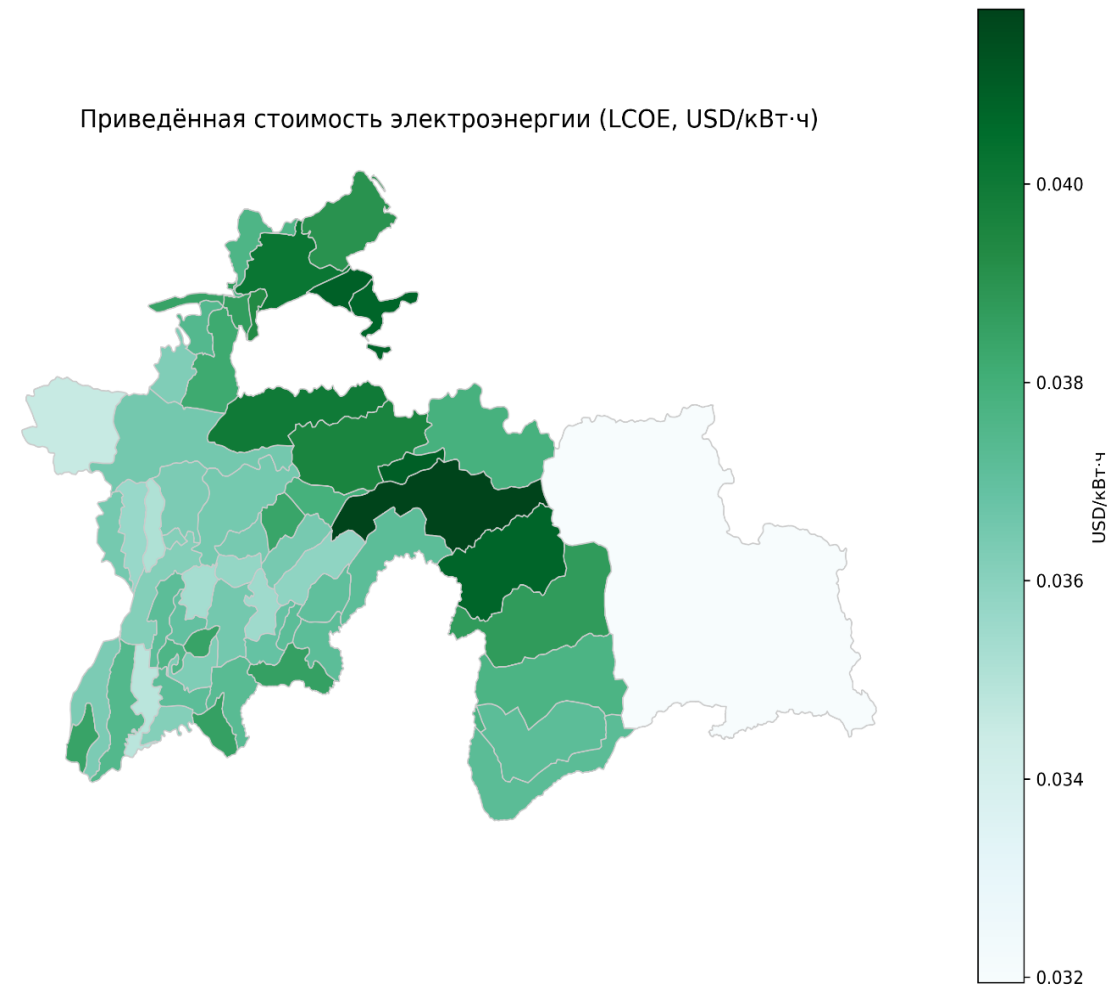
По сравнению с прогнозируемым годовым потреблением электроэнергии в Таджикистане в 15,2 ТВт ч в 2024 году, **солнечные батареи на крышах представляют собой значительный потенциал для страны**

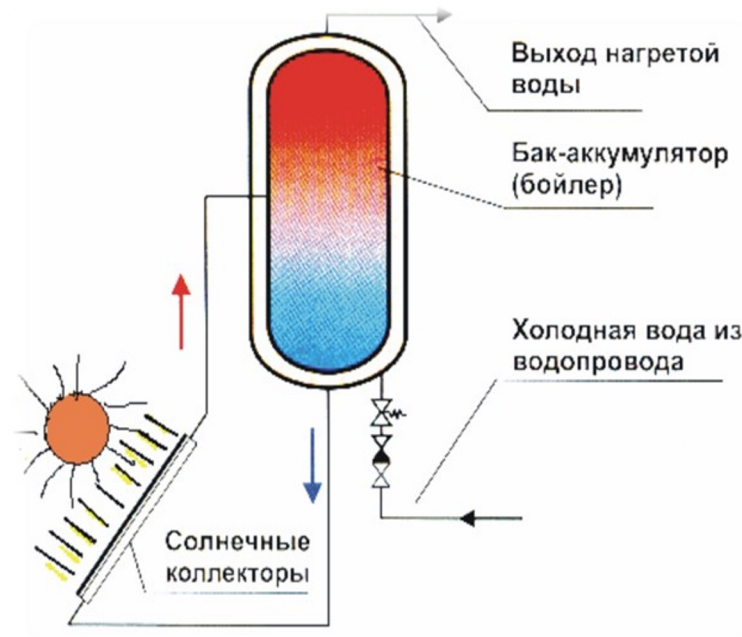
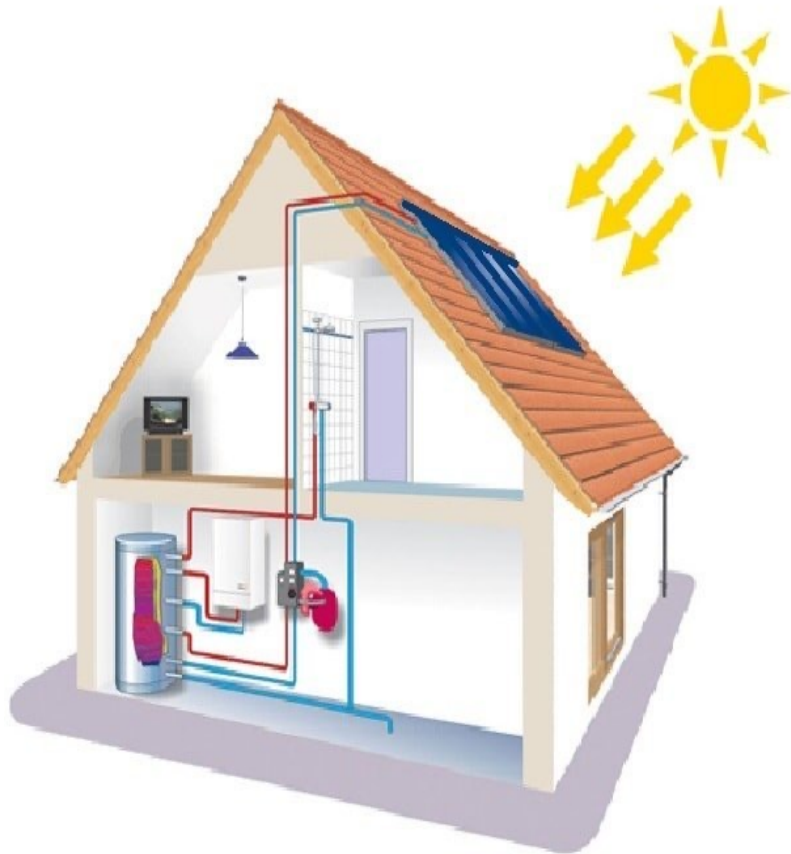
Пространственное распределение установленной мощности (ГВт) и средних значений LCOE по районам.

Установленная мощность солнечных систем (МВт)

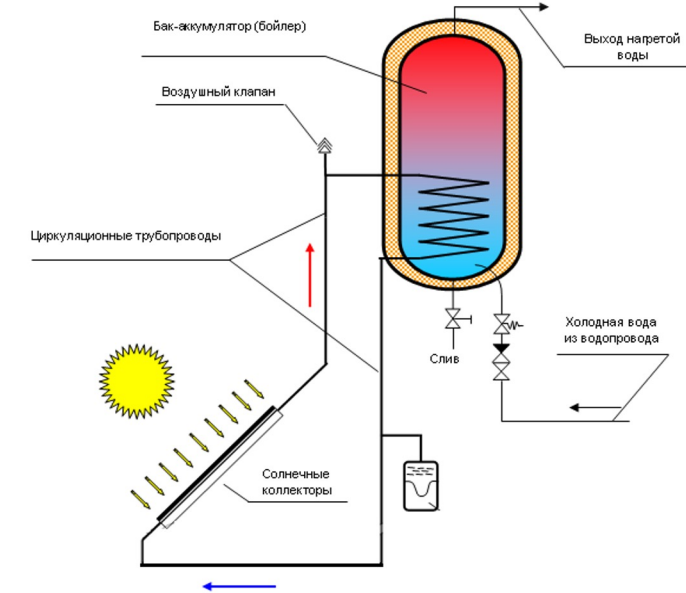


Приведённая стоимость электроэнергии (LCOE, USD/кВт·ч)

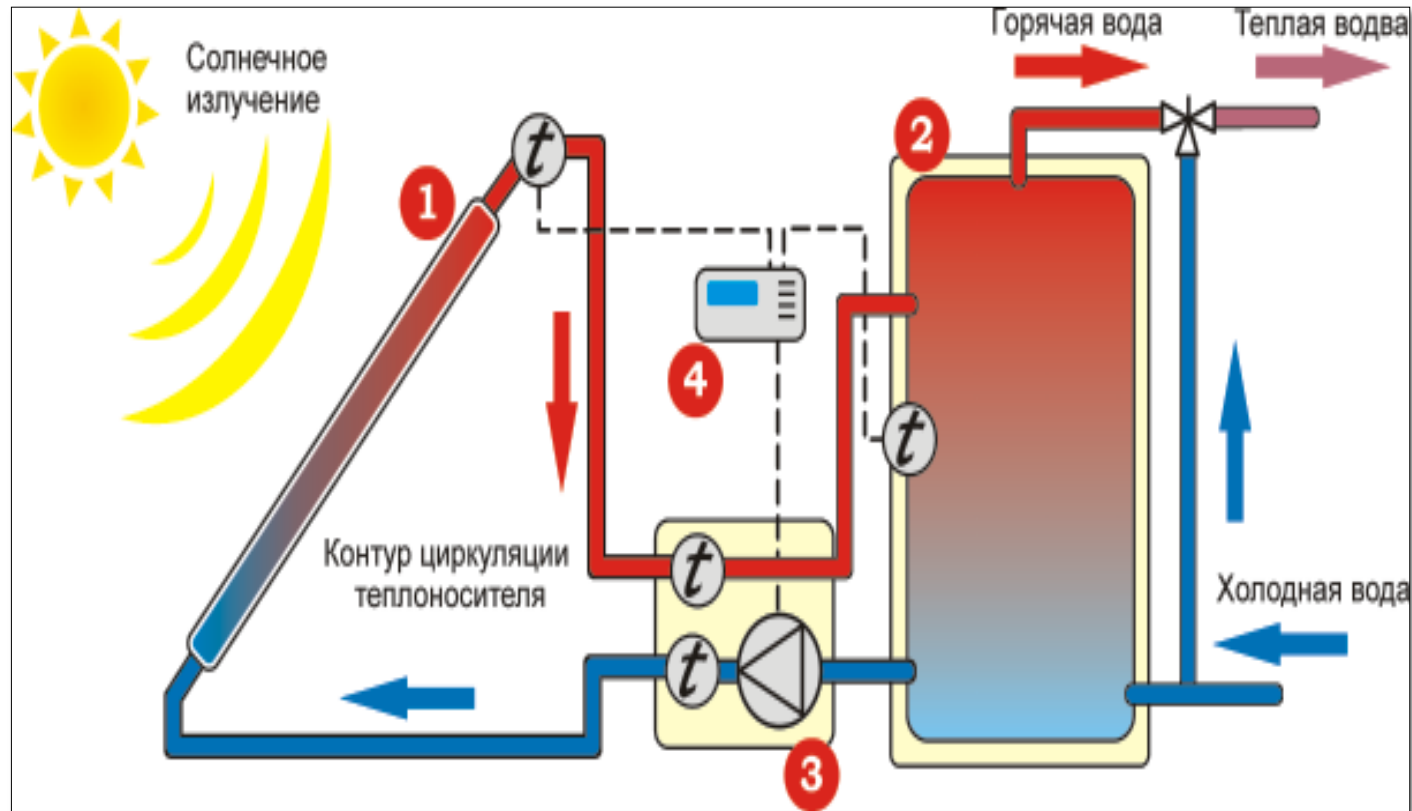




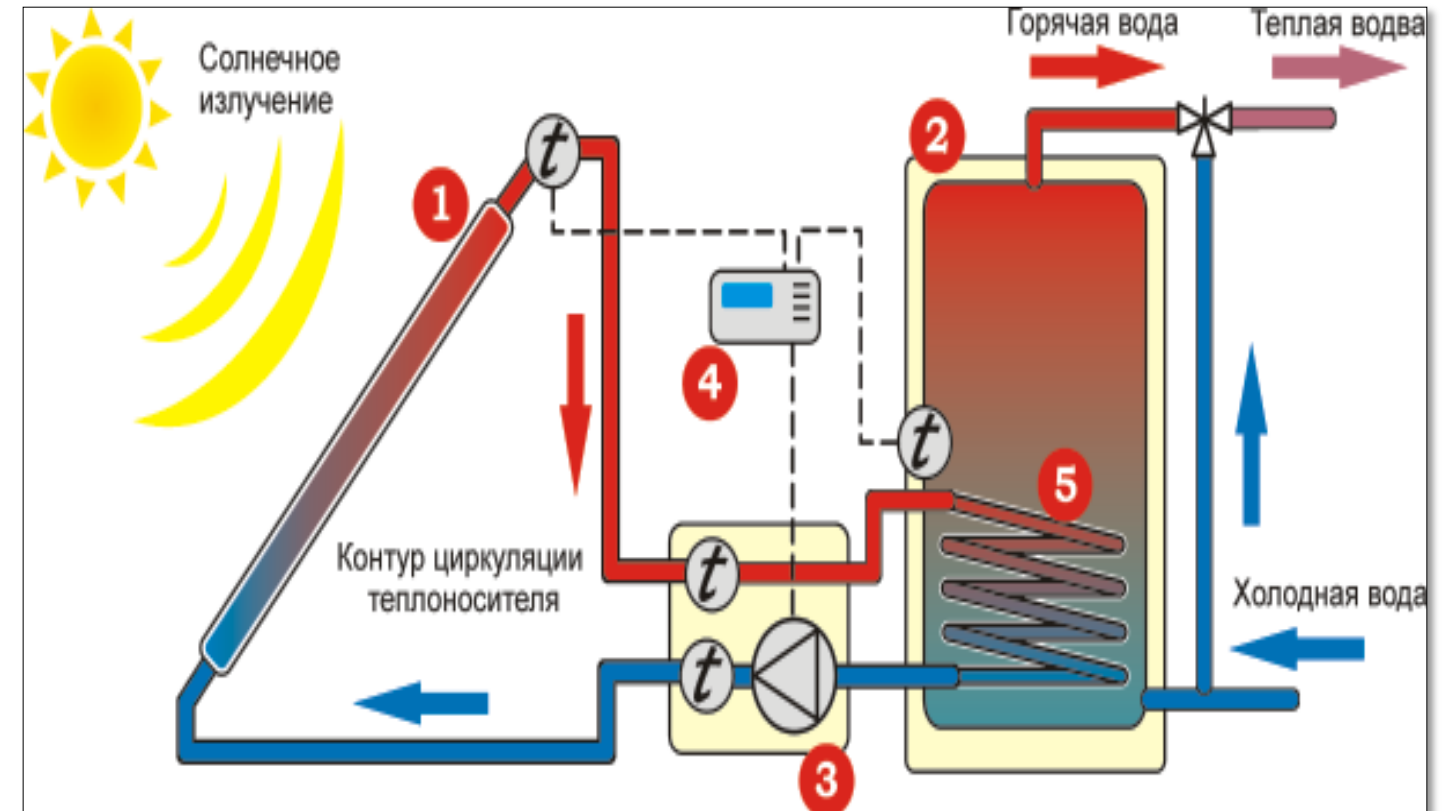
Одноконтурное с естественной циркуляцией
(термосифонные)



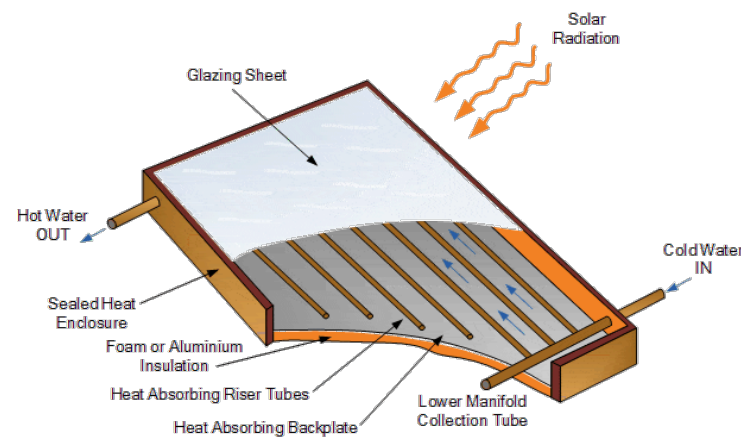
Двухконтурные с естественной циркуляцией
(термосифонные)



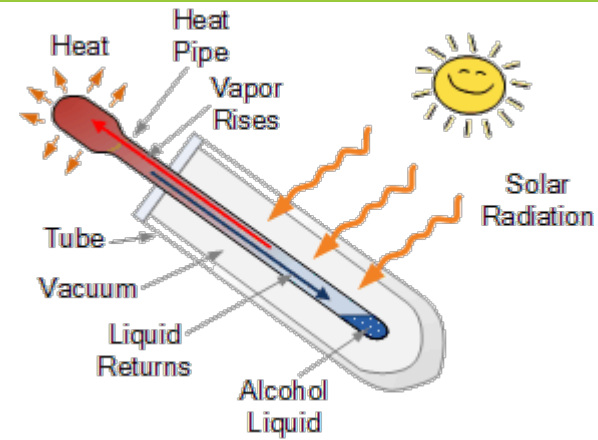
Одноконтурное с принудительной циркуляцией



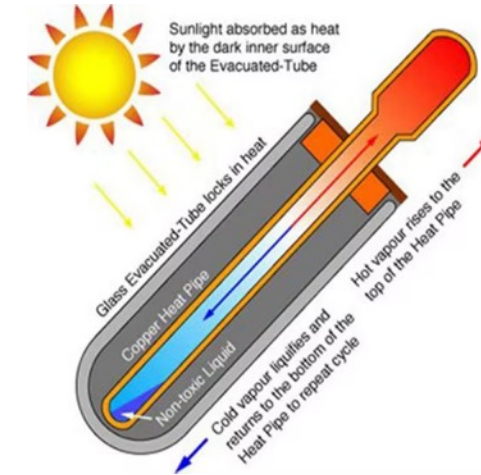
Двухконтурные с принудительной циркуляцией



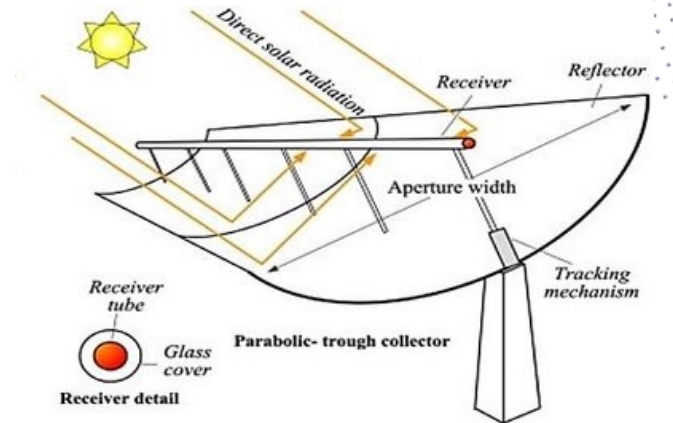
Плоский солнечный коллектор



Вакуумный трубчатый коллектор
тип Heat-Pipe



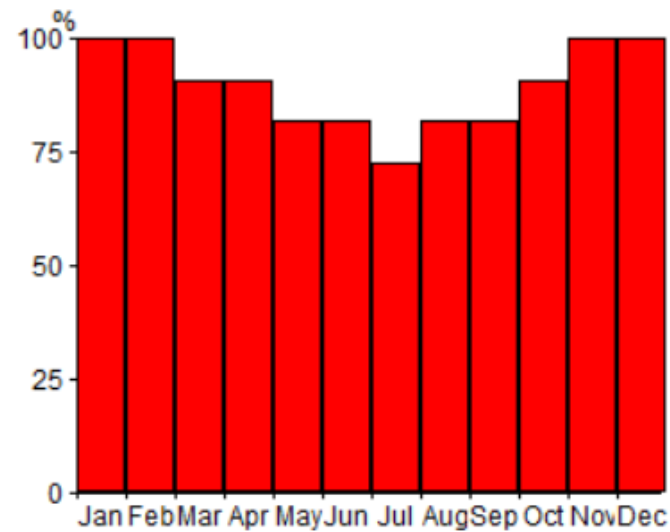
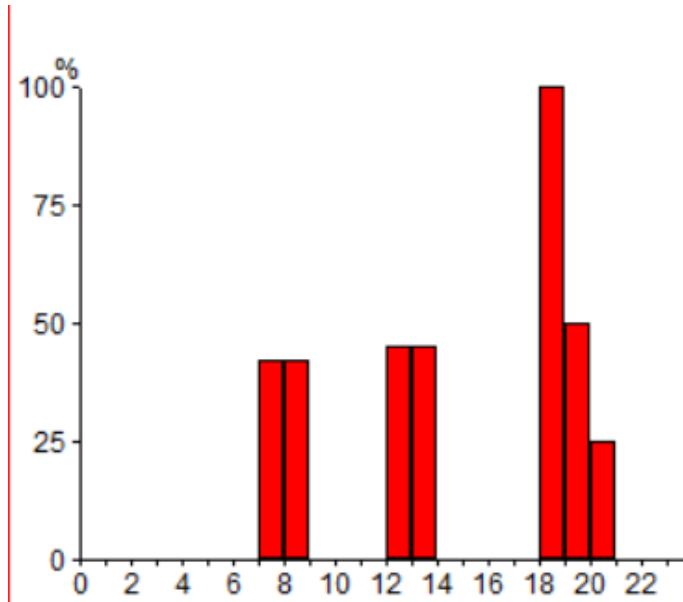
Вакуумный трубчатый коллектор
тип U-Tube



Концентрирующие системы

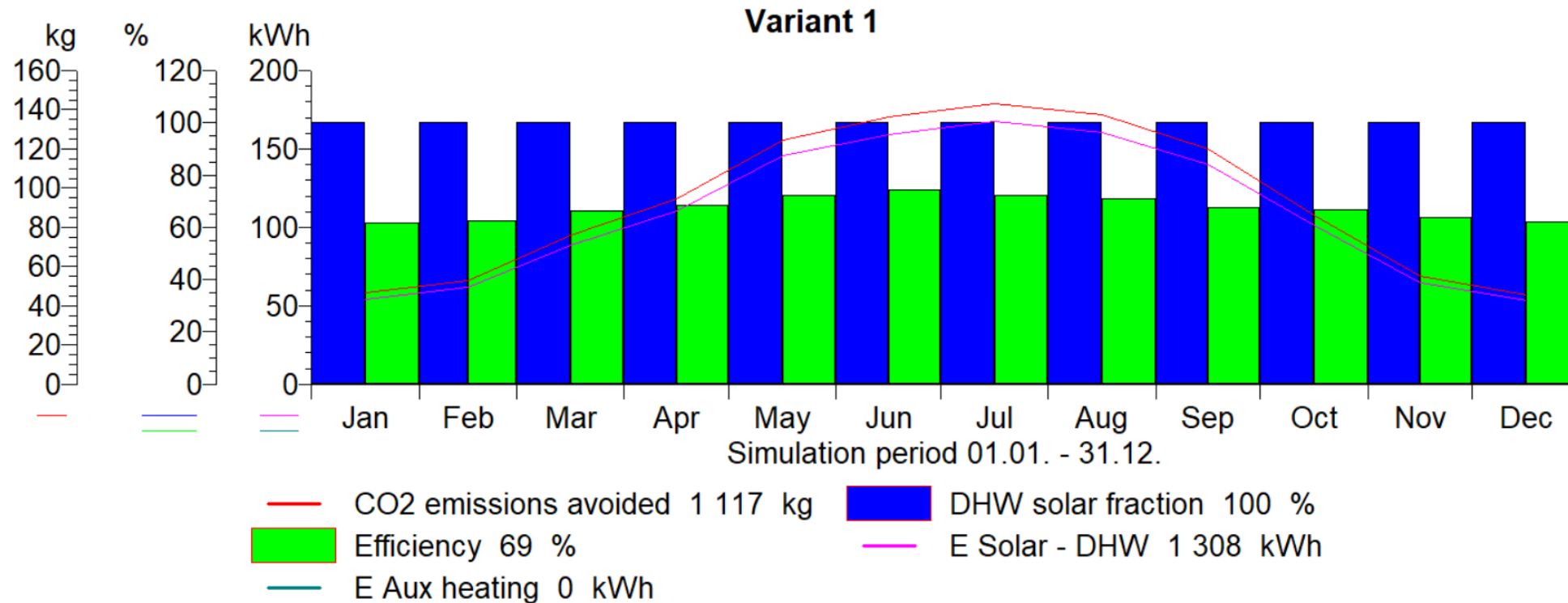
Сравнительная оценка применимости технологий солнечных тепловых коллекторов для объектов жилой и социальной инфраструктуры Республики Таджикистан

Критерий	Плоский солнечный коллектор (Flat Plate Collector, FPC)	Вакуумный трубчатый коллектор — тип Heat-Pipe (ETC-HP)	Вакуумный трубчатый коллектор — тип U-Tube (ETC-U)	Концентрирующие системы (CPC / PTC)
Тип поглощаемого излучения	Эффективен при прямом и рассеянном излучении	Эффективен при прямом и рассеянном излучении	Эффективен при прямом излучении, менее чувствителен к углу падения	Требуется прямого излучения (DNI)
Оседание пыли на поверхности	Существенно влияет, необходима регулярная очистка	Частично самочищается за счёт цилиндрической формы труб	Требуется периодической очистки внутренней части при длительной эксплуатации	Очень высокая чувствительность; требуется частая мойка отражателей
Работа в зимний период	Снижение эффективности из-за теплопотерь и обмерзания	Высокая эффективность благодаря вакуумной изоляции	Хорошая теплопроизводительность, но риск повреждения при замерзании	Эффективность резко снижается при низком солнце и снеговом покрове
Рабочий температурный диапазон	45–70 °C (типичные системы ГВС)	60–120 °C (медицинские и гостиничные объекты)	50–100 °C (непрерывные нагрузки, бассейны)	> 120 °C (промышленное тепло, пар)
Эксплуатационные требования	Простое обслуживание, подходит для персонала без инженерной квалификации	Требуется периодический контроль теплоносителя и давления	Требуется квалифицированного обслуживания и проверки герметичности	Требуется инженерный персонал и система слежения за солнцем
Конструктивная нагрузка на кровлю	Низкая, равномерно распределённая	Умеренная, с точечными нагрузками на опоры	Умеренная; требует точного выравнивания труб	Высокая (тяжёлые трекеры и отражатели)
Совместимость с инфраструктурой школ и жилых домов	Высокая — оптимально для жилых и образовательных зданий	Средняя — при наличии эксплуатационной службы	Ограниченная — для специализированных учреждений с постоянным потреблением	Низкая — нецелесообразно для стандартных зданий
Экономическая целесообразность в условиях Таджикистана	Выгодны в тёплых и долинных районах с умеренной запылённостью и доступом к очистке	Оптимальны для большинства регионов, включая горные и пыльные, при наличии обслуживающего персонала	Перспективны в холодных районах с высокой потребностью в ГВС при надлежащем обслуживании	Не рекомендованы — высокая стоимость, требовательность к DNI
Рекомендуемые зоны внедрения	Жилые дома, школы, детские сады, административные здания	Больницы, спорткомплексы, интернаты, гостиницы, горные районы	Санатории, учреждения с круглогодичным ГВС, бассейны	Промышленные предприятия, технологическое тепло



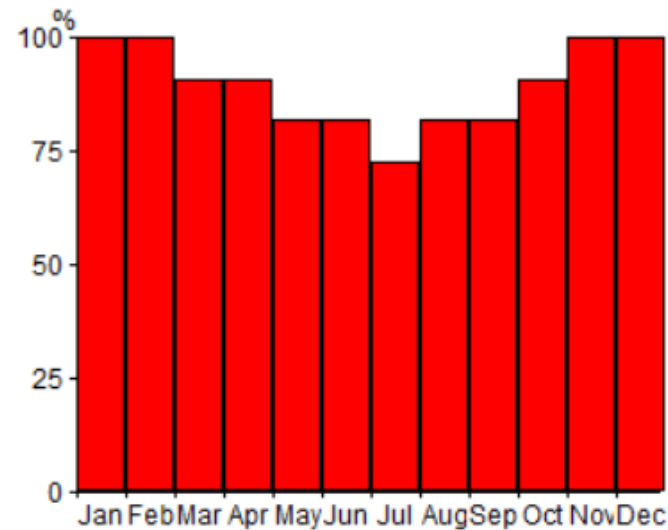
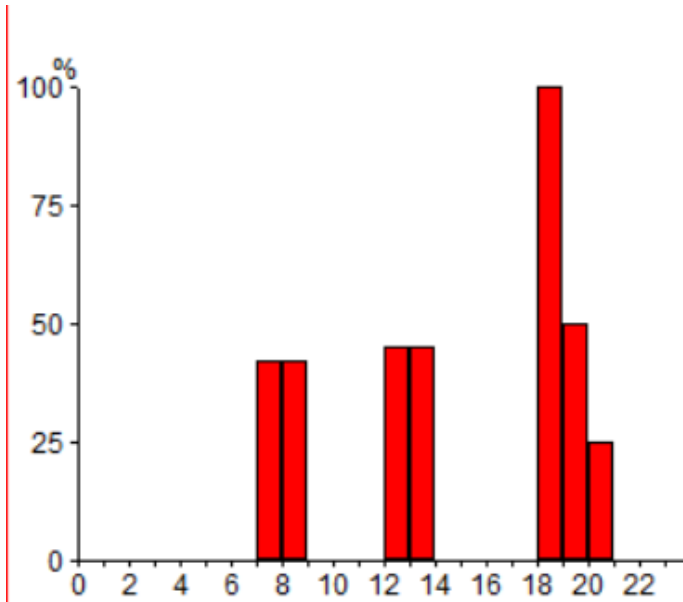
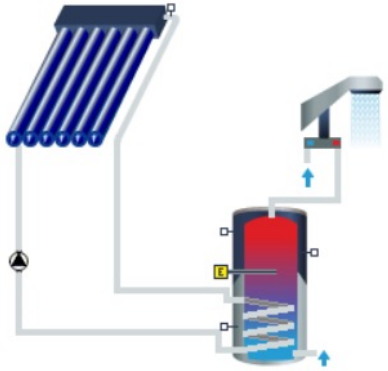
Показатель	Значение
Среднесуточное потребление	160 л
Годовое потребление	58 400 л
Максимальное суточное потребление	189 л
Требуемая температура воды	60,0 °C
Температура холодной воды (мин. / макс.)	14,0 °C / 22,0 °C
Годовая потребность в энергии	7 752 372 193 Дж
Количество дней работы в году	365 дней
Периоды неработы	— без ограничений —
Циркуляция	отсутствует

Параметр	Значение	Единица измерения	Описание
Срок службы системы (Life span)	20	лет	Продолжительность эксплуатации системы
Процент на капитал (Interest on capital)	10	%	Годовая процентная ставка на инвестированный капитал
Доходность реинвестиций (Reinvestment return)	0	%	Доход от повторно инвестированных средств
Удельные инвестиции (Спец. Investments – Collector)	ВВОД ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ	USD/m ²	Инвестиционные затраты на единицу площади коллектора
Удельная субсидия (Спец. Subsidy)	0	USD/m ²	Субсидия на единицу площади коллектора
Рост цен на энергию (Energy)	0 % (электричество), 0 % (природный газ)	%	Ежегодный прирост тарифов на энергию
Рост эксплуатационных затрат (Running costs)	0	%	Годовой прирост эксплуатационных расходов
Размер поощрения (Amount)	0	USD/kWh	Премия за каждый выработанный кВт·ч солнечного тепла
Продолжительность выплат (Payout Duration)	0	лет	Период действия субсидий
Индексирование выплат (Adjustment)	0	%/год	Годовое увеличение размера поощрения
Затраты на обслуживание (Maintenance costs)	2 % от CAPEX	USD/год	Ежегодные расходы на техническое обслуживание
Страхование (Insurance)	1 % от CAPEX	USD/год	Ежегодные страховые взносы
Прочие расходы (Other costs)	0	USD/год	Прочие ежегодные расходы
Сумма кредита (Loan amount)	0	USD	Общая сумма кредита
Процентная ставка по кредиту (Interest rate)	0	%	Годовая процентная ставка по кредиту
Срок кредита (Loan term)	0	лет	Продолжительность кредитного периода



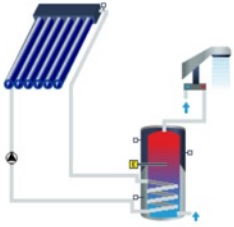
Показатель	Значение
Стоимость солнечной энергии	0,049 \$/кВт ч
Оставшийся объём инвестиций	550 \$
Срок окупаемости капитальных вложений	8,7 года
Амортизационный период	18,7 года

Моделирование СВС (с учётом дополнительного нагрева)

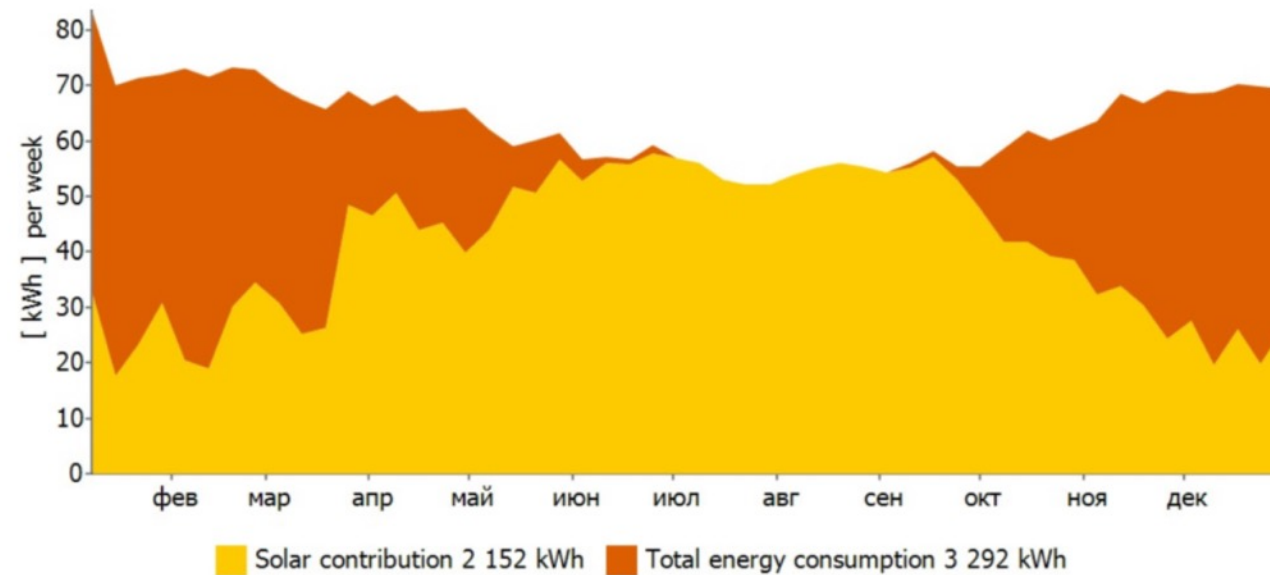


Показатель	Значение
Среднесуточное потребление	160 л
Годовое потребление	58 400 л
Максимальное суточное потребление	189 л
Требуемая температура воды	60,0 °C
Температура холодной воды (мин. / макс.)	14,0 °C / 22,0 °C
Годовая потребность в энергии	7 752 372 193 Дж
Количество дней работы в году	365 дней
Периоды неработы	— без ограничений —
Циркуляция	отсутствует

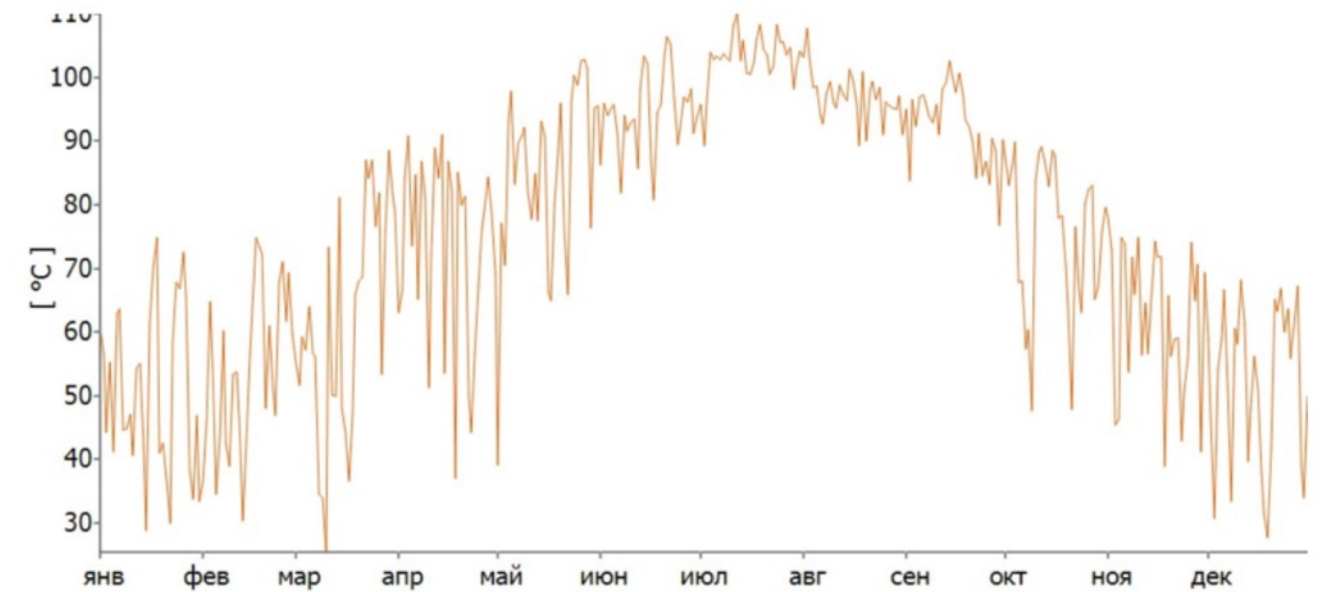
Параметр	Значение	Единица измерения	Описание
Срок службы системы (Life span)	20	лет	Продолжительность эксплуатации системы
Процент на капитал (Interest on capital)	10	%	Годовая процентная ставка на инвестированный капитал
Доходность реинвестиций (Reinvestment return)	0	%	Доход от повторно инвестированных средств
Удельные инвестиции (Spec. Investments – Collector)	ВВОД ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ	USD/m ²	Инвестиционные затраты на единицу площади коллектора
Удельная субсидия (Spec. Subsidy)	0	USD/m ²	Субсидия на единицу площади коллектора
Рост цен на энергию (Energy)	0 % (электричество), 0 % (природный газ)	%	Ежегодный прирост тарифов на энергию
Рост эксплуатационных затрат (Running costs)	0	%	Годовой прирост эксплуатационных расходов
Размер поощрения (Amount)	0	USD/kWh	Премия за каждый выработанный кВт·ч солнечного тепла
Продолжительность выплат (Payout Duration)	0	лет	Период действия субсидий
Индексирование выплат (Adjustment)	0	%/год	Годовое увеличение размера поощрения
Затраты на обслуживание (Maintenance costs)	2 % от CAPEX	USD/год	Ежегодные расходы на техническое обслуживание
Страхование (Insurance)	1 % от CAPEX	USD/год	Ежегодные страховые взносы
Прочие расходы (Other costs)	0	USD/год	Прочие ежегодные расходы
Сумма кредита (Loan amount)	0	USD	Общая сумма кредита
Процентная ставка по кредиту (Interest rate)	0	%	Годовая процентная ставка по кредиту
Срок кредита (Loan term)	0	лет	Продолжительность кредитного периода

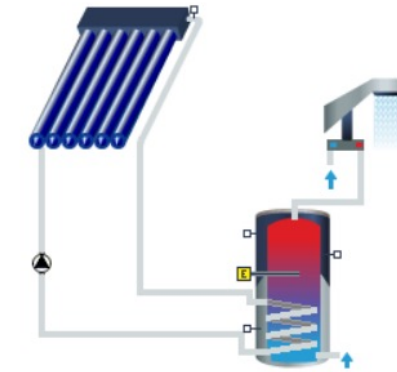
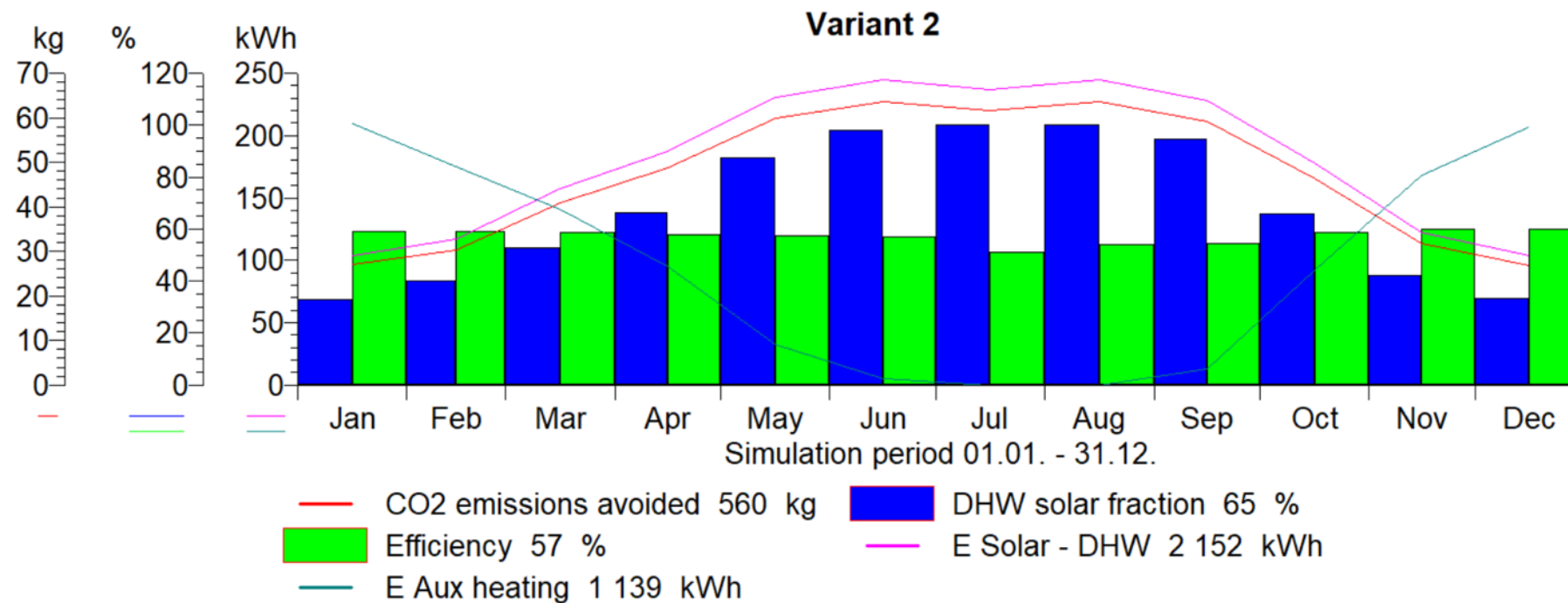


Solar energy consumption as percentage of total consumption



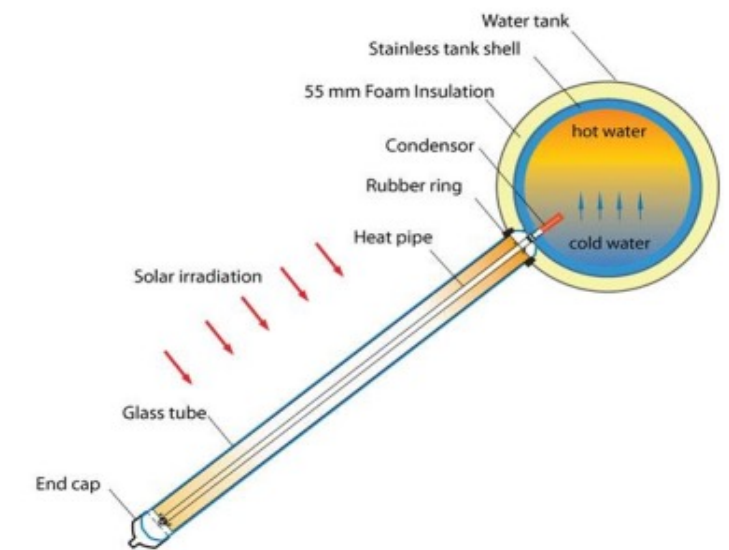
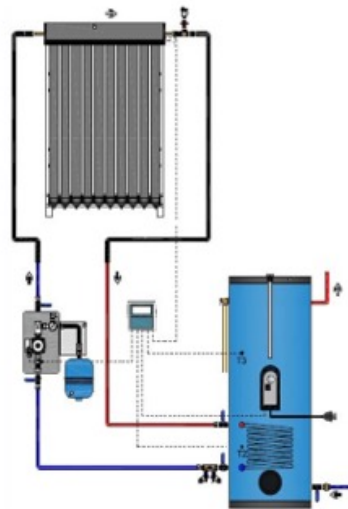
Daily maximum collector temperature





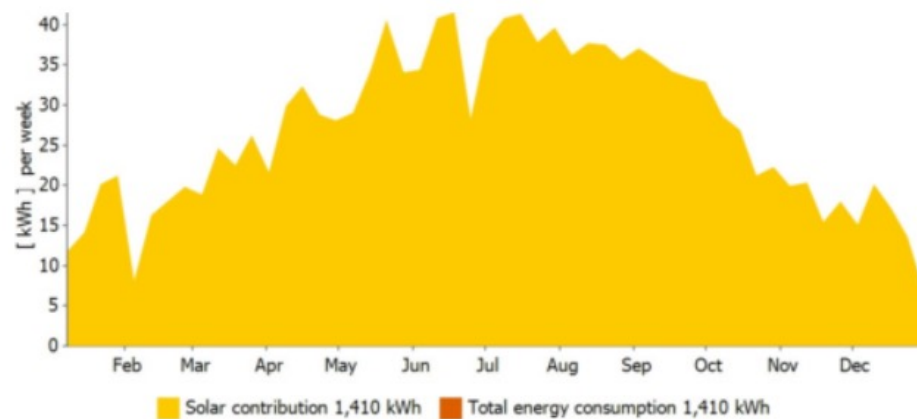
Стоимость солнечной энергии	0,053 \$/кВт·ч
Оставшийся объём инвестиций	650 \$

Split type Solar Water Heater





Solar energy consumption as percentage of total consumption



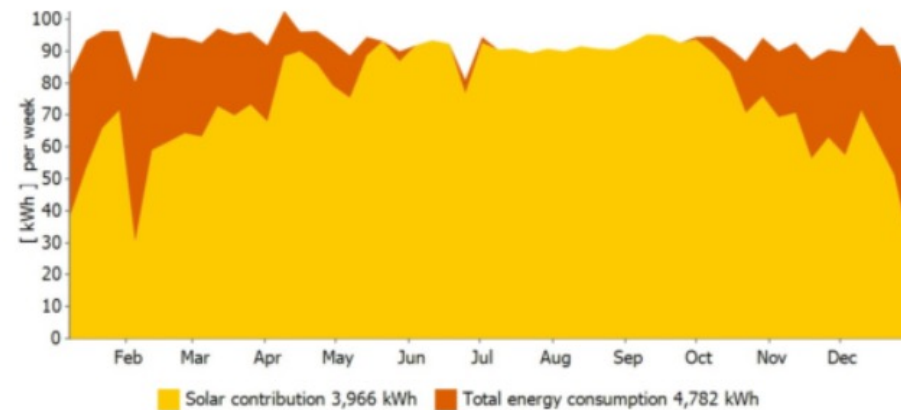
P50									
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference (kWh)		Payback (years)	Total price (USD)
200	100	1	0.017	1342	1342	0	Optimal	9.9	650
400	100	2	0.02	2306	2306	0		11.3	1300
600	100	3	0.024	2870	2870	0		13.4	1950
800	100	4	0.028	3348	3348	0		15	2600
1000	100	5	0.031	3756	3756	0		16.5	3250
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference (kWh)		Payback (years)	Total price (USD)
200	150	1	0.016	1410	1410	0	Optimal	9.4	650
400	150	2	0.018	2631	2631	0		10.1	1300
600	150	3	0.021	3353	3353	0		11.6	1950
800	150	4	0.024	3895	3895	0		13.2	2600
1000	150	5	0.027	4340	4340	0		14.5	3250
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference (kWh)		Payback (years)	Total price (USD)
200	200	1	0.016	1410	1410	0	Optimal	9.4	650
400	200	2	0.016	2863	2863	0		9.3	1300
600	200	3	0.019	3743	3743	0		10.5	1950
800	200	4	0.021	4393	4393	0		11.8	2600
1000	200	5	0.024	4901	4901	0		13.1	3250



P90							
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference	
200	100	1	0.033	1536	2310	774	
400	100	2	0.029	2323	2836	513	Optimal
600	100	3	0.031	2824	3254	430	
800	100	4	0.034	3284	3640	356	
1000	100	5	0.036	3713	4017	304	
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference	
200	150	1	0.038	1719	2972	1253	
400	150	2	0.027	2763	3541	778	Optimal
600	150	3	0.028	3328	3944	616	
800	150	4	0.031	3809	4322	513	
1000	150	5	0.033	4250	4680	430	
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference	
200	200	1	0.044	1846	3544	1698	
400	200	2	0.027	3145	4241	1096	Optimal
600	200	3	0.027	3807	4662	855	
800	200	4	0.028	4337	5030	693	
1000	200	5	0.029	4830	5373	543	



Solar energy consumption as percentage of total consumption



P50									
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference		Payback (years)	Total price
200	100	1	0.045	1302	3705	2403			1397
200	100	2	0.025	2653	3935	1282			1785
200	100	3	0.023	3457	4259	802	Optimal	9.5	2173
200	100	4	0.024	3777	4395	618			2561
200	100	5	0.026	3975	4473	498			2949
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference		Payback (years)	Total price
200	150	1	0.042	1433	4558	3125			1397
200	150	2	0.023	2873	4751	1878			1785
200	150	3	0.02	3883	5050	1167	Optimal	8.5	2173
200	150	4	0.021	4307	5202	895			2561
200	150	5	0.023	4546	5291	745			2949
Tank Capacity (liter)	Daily water usage (liter/day)	Number of Collectors	COE, \$/kwh	Solar contribution (kWh)	total energy consumption (kWh)	Difference		Payback (years)	Total price
200	200	1	0.041	1514	5424	3910			1397
200	200	2	0.023	3034	5575	2541			1785
200	200	3	0.019	4178	5856	1678	Optimal	8	2173
200	200	4	0.019	4740	6022	1282			2561
200	200	5	0.021	5036	6115	1079			2949



P90

TANK 200l (100l/day)	COE, \$/kwh	solar contribution	total energy consumption	difference	
1	0.152	1244	1925	681	
2	0.118	1779	2055	276	Optimal
3	0.128	1943	2091	148	
4	0.146	1992	2098	106	
5	0.165	2019	2100	81	
				0	
				0	
				0	
TANK 200l (150l/day)	COE, \$/kwh	solar contribution	total energy consumption		
1	0.157	1408	2620	1212	
2	0.101	2236	2759	523	Optimal
3	0.104	2469	2779	310	
4	0.116	2565	2792	227	
5	0.130	2612	2795	183	
				0	
				0	
				0	
TANK 200l (200l/day)	COE, \$/kwh	solar contribution	total energy consumption		
1	0.161	1530	3166	1636	
2	0.090	2647	3406	759	Optimal
3	0.090	2973	3458	485	
4	0.098	3123	3484	361	
5	0.108	3212	3495	283	

1. Таджикистан обладает высоким солнечным потенциалом — до 2 200 кВт·ч/м² в год и более 280 солнечных дней, что делает использование солнечных тепловых систем технически оправданным во всех регионах страны.
2. Солнечные коллекторы обеспечивают экономию электроэнергии и устойчивое ГВС, особенно в жилом и социальном секторе (дома, школы, больницы, интернаты).
3. Экономическая эффективность подтверждена моделированием:
 - Удельная стоимость тепла (COE): 0,016–0,02 USD/кВт·ч
 - Срок окупаемости: 8–10 лет
 - Срок службы систем: более 20 лет
4. Экологический эффект: Сокращение выбросов парниковых газов — в среднем 0,5–1,0 тонны CO₂-эквивалента в год на один объект (в зависимости от типа топлива и объёма замещения).
5. Наиболее эффективны вакуумные трубчатые коллекторы (Heat Pipe / U-Tube) — благодаря высокой теплоизоляции, устойчивости к пыли и работе при низких температурах.
6. Массовое внедрение солнечных водонагревателей способствует достижению целей устойчивого развития (ЦУР 7 и 13), повышению энергоэффективности и энергетической независимости страны.

Приложения

1. Методологические допущения и упрощения

- **Отсутствие высотных данных (LiDAR/DSM)**
Оценка формы и ориентации крыш выполняется на основе 2D-контуров зданий (данные Microsoft Building Footprints), обработанных методом главных компонент (PCA). Наклон крыш, высотные различия, тени от окружающих объектов и рельеф местности **не учитываются**
- **Единая конфигурация солнечной панели**
Применяется типовая панель мощностью 400 Вт с размерами 1.775 × 1.098 м и углом наклона 30°. Модель не учитывает различия в технологиях (например, бифасиальные панели), компоновке (портрет/ландшафт), типах креплений и инверторах
- **Фиксированные параметры установки**
Панели предполагается устанавливать с наклоном 30° и южной ориентацией (180°). Коэффициент ориентации рассчитывается через косинусную функцию, ограниченную минимальным значением 0.5. Сезонные изменения угла инсоляции и доля рассеянного излучения не моделируются
- **Межрядовое расстояние (интерференционные потери)**
Расстояние между рядами панелей рассчитывается по углу зимнего солнца (на основе широты). Однако фактическая компоновка панелей, самозатенение и тени от элементов крыши не моделируются
- **Полезная площадь крыши**
Используется коэффициент пригодности крыши 0.85, дополнительно скорректированный по межрядовому расстоянию. Архитектурные элементы (вентиляция, дымоходы, мансардные окна и пр.) не исключаются из расчётов

2. Ограничения исходных данных

- **Контуры зданий**
Используются данные Microsoft Building Footprints. Несмотря на их широкое покрытие, в базе могут присутствовать ошибки: дубликаты, фрагментированные здания, неверная классификация или отсутствие данных в сельских/горных районах
- **Солнечная радиация (PVOUT)**
Используются данные SolarGIS в виде растра с долгосрочными усреднёнными значениями глобальной солнечной радиации (GHI) на горизонтальную поверхность. Значения интерполируются по центроидам зданий. Точность снижается при больших или сложных по форме зданиях. PVOUT предполагается равномерным в пределах растровой ячейки
- **Пространственные преобразования**
Многочисленные переходы между системами координат (WGS84 → UTM → CRS растра) могут незначительно исказить геометрию зданий, особенно на границах проекционных зон
- **Финансово-экономические предположения**
Экономические параметры (тарифы, стоимость установки, эксплуатационные расходы) основаны на данных 2025 года

3. Технические ограничения алгоритма

- **Оценка азимута зданий**
При отсутствии поля азимут ориентация вычисляется с помощью PCA по координатам полигона. Метод может давать искажения для L-образных, П-образных и нестандартных форм крыш.
- **Подсчёт панелей**
Число панелей округляется в меньшую сторону. Внутренняя укладка панелей по форме крыши, расположение по рядам, ориентации и допустимые зазоры **не моделируются**.
- **Фактическая генерация**
Фактическая генерация может отличаться из-за температурных эффектов, пылевых отложений, деградации модулей, неидеального MPPT, потерь на инверторах и т.д.

4. Юридические и организационные оговорки

- Результаты предназначены **исключительно для предварительного анализа** и не могут использоваться как основа для разрешительных процедур или инвестиционных решений без полевого обследования.
- Разработчики и исполнители анализа **не несут ответственности** за убытки, связанные с использованием предоставленных данных.
- Результаты могут быть уточнены по мере поступления новых данных (LiDAR, обследования, тарифы, сетевые ограничения и пр.).

5. Рекомендации к использованию

- **Полевые обследования:** проверка структуры крыши, несущей способности, наличия препятствий.
- **Анализ затенения:** с использованием моделей поверхности или БПЛА-съёмки.
- **Экономическая оценка:** учёт актуализированных данных по затратам, тарифам, стоимости инверторов, банковским процентам и пр.
- **Оценка возможностей подключения:** анализ сетевой инфраструктуры, нагрузки и пропускной способности.

Методология оценки технического и экономического потенциала солнечных фотоэлектрических систем на крышах зданий

1. Источники данных

- Контуры зданий: Microsoft Building Footprints (2023)
- Солнечная радиация: PVOUT.tif (SolarGIS, среднегодовое GHI, пространственное разрешение ~1 км)
- Основные допущения:
 - Мощность панели: 400 Вт
 - Размер панели: 1.775×1.098 м
 - Угол наклона: 30°
 - Полезная площадь крыши: 85% от общей площади $\times$ коэффициент ориентации $\times$ коэффициент размещения (рядов)

2. Обработка данных

1. **Загрузка данных:** Векторные файлы (.gpkg) загружаются с использованием GeoPandas. Проверяется наличие столбца area_m2. Если он отсутствует, используется roof_area.
2. **Проверка CRS:** Если система координат не указана, предполагается WGS84 (EPSG:4326).
3. **Фильтрация геометрий:** Удаляются невалидные и пустые геометрии. Применяется фильтр по площади: $20 \leq \text{area_m2} \leq 2000$.
4. **Исправление геометрий:** Используется метод `buffer(0)` для устранения топологических ошибок.

3. Геопространственные расчеты

1. **Определение UTM-зоны:** Зона UTM определяется по формуле:

$$\text{zone} = \lfloor (\text{lon} + 180) / 6 \rfloor + 1, \quad \text{EPSG} = 32600 + \text{zone}$$

где lon — долгота центроида региона.

2. **Ориентация крыши:** Рассчитывается угол азимута (α) через минимальный ограничивающий прямоугольник (MRR):

$$\alpha = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x) \bmod 180^\circ$$

где $\Delta x, \Delta y$ — разницы координат соседних вершин MRR.

3. **Коэффициент ориентации:** Коэффициент (k_{orient}) вычисляется как:

$$k_{\text{orient}} = \max(\cos(0.9 \cdot \min(|\alpha - \alpha_{\text{opt}}|, 360 - |\alpha - \alpha_{\text{opt}}|)), 0.5)$$

где $\alpha_{\text{opt}} = 180^\circ$.

4. Технические расчёты

1. **Площадь панели:** Площадь одной панели с учётом наклона ($\theta = 30^\circ$):

$$A_{\text{panel}} = \frac{L_{\text{panel}}}{\cos(\theta)} \cdot W_{\text{panel}}$$

где $L_{\text{panel}} = 1.775 \text{ м}$, $W_{\text{panel}} = 1.098 \text{ м}$.

2. **Межрядное расстояние:** Расстояние между рядами (D_{row}) для минимизации затенения:

$$D_{\text{row}} = \frac{L_{\text{panel}} \cdot \sin(\theta)}{\tan(\max(5^\circ, 90^\circ - \text{lat}))}$$

где lat — широта региона.

3. **Коэффициент плотности:** Доля полезной площади с учётом межрядного расстояния:

$$k_{\text{spacing}} = \frac{A_{\text{panel}}}{A_{\text{panel}} + D_{\text{row}} \cdot W_{\text{panel}}}$$

4. **Полезная площадь:** Полезная площадь крыши (A_{usable}):

$$A_{\text{usable}} = A_{\text{roof}} \cdot k_{\text{usable}} \cdot k_{\text{spacing}}$$

где $k_{\text{usable}} = 0.85$.

5. **Количество панелей:** Целое число панелей (N_{panels}):

$$N_{\text{panels}} = \lfloor A_{\text{usable}} / A_{\text{panel}} \rfloor$$

6. **Установленная мощность:** Общая мощность (P_{total}):

$$P_{\text{total}} = N_{\text{panels}} \cdot P_{\text{panel}}$$

где $P_{\text{panel}} = 0.4 \text{ кВт}$.

7. **Годовая генерация:** Годовая выработка энергии (E_{annual}):

$$E_{\text{annual}} = P_{\text{total}} \cdot \text{PVOUT} \cdot k_{\text{orient}} \cdot k_{\text{shading}}$$

где PVOUT — удельная генерация (кВт·ч/кВт·год), $k_{\text{shading}} = 0.95$.

5. Экономические расчёты

1. **Классификация зданий:** Здания классифицируются как коммерческие, если $A_{\text{roof}} > 1000 \text{ м}^2$, иначе — жилые.

2. **Тариф:** Эффективный тариф (T_{eff}):

$$T_{\text{eff}} = \begin{cases} 0.046 \text{ USD/кВт·ч}, & \text{если } A_{\text{roof}} > 1000 \text{ м}^2 \\ 0.03 \text{ USD/кВт·ч}, & \text{иначе} \end{cases}$$

3. **Стоимость установки:** Стоимость (C_{install}):

$$C_{\text{install}} = P_{\text{total}} \cdot C_{\text{panel}} \cdot k_{\text{install}}$$

где $C_{\text{panel}} = 820 \text{ USD/кВт}$, $k_{\text{install}} = 1.2$.

4. **Годовая выручка:** Выручка (R_{annual}):

$$R_{\text{annual}} = E_{\text{annual}} \cdot T_{\text{eff}}$$

5. **Эксплуатационные расходы:** Годовые расходы (C_{om}):

$$C_{\text{om}} = P_{\text{total}} \cdot 18 \text{ USD/кВт}$$

6. **Годовая прибыль:** Прибыль (Π_{annual}):

$$\Pi_{\text{annual}} = R_{\text{annual}} - C_{\text{om}}$$

7. **Срок окупаемости:** Простой срок окупаемости (ROI):

$$\text{ROI} = \begin{cases} \frac{C_{\text{install}}}{\Pi_{\text{annual}}}, & \text{если } \Pi_{\text{annual}} > 0 \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$

8. **Чистая приведённая стоимость:** NPV с учётом ставки дисконтирования ($r = 0.11$) и срока проекта ($T = 25$ лет):

$$\text{NPV} = \Pi_{\text{annual}} \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-T}}{r} - C_{\text{install}}$$

9. **Уровень затрат (LCOE):** Базовый LCOE:

$$\text{LCOE}_{\text{base}} = \begin{cases} \frac{C_{\text{install}} \cdot r / (1 - (1 + r)^{-T}) + C_{\text{om}}}{E_{\text{annual}}}, & \text{если } E_{\text{annual}} > 0 \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$