



Qirg'iz Respublikasi quyosh energetikasi salohiyatining radiatsiya, hudud va infratuzilma omillarini hisobga olgan kompleks bahosi

Ergashali Yu. Raximov^{1,a}, Nilufar R. Avezova², Idirisbek G. Kenjayev³,
Janbolot J. Tursunbayev⁴

^{1,a} DSc, kat.i.x., Gidrometeorologiya ilmiy-tadqiqot instituti, 100052, Toshkent, O'zbekiston; eyurakhimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7128-4598>

² DSc, prof., Farg'ona politexnika instituti, 150107, Farg'ona, O'zbekiston; avezovanr@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>.

³ DSc, prof., O'sh davlat universiteti, 723500, O'sh, Qirg'iz Respublikasi; kenjaevig@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8094-2553>.

⁴ DSc, dots., O'sh texnologiya universiteti, 723503, O'sh, Qirg'iz Respublikasi; jhanbolot.72@gmail.com, 0009-0006-8465-7879.

Dolzarbli: Qirg'iziston Respublikasi quyosh radiatsiyasining katta resursiga ega, biroq uning elektr energetikasi asosan gidrogeneratsiyaga tayanadi, yuklamaning qishki cho'qqisi esa daryo oqimining mavsumiy minimumiga to'g'ri keladi. Darajalari yagona to'r va davr bo'yicha hisoblangan, viloyatlarni taqqoslash esa barqarorlikka tekshirilgan salohiyatni kelishilgan ichma-ich baholash vazifasi hal etilmagan.

Maqsad: tarmoqqa ulangan fotoelektr stansiyalarning yalpi radiatsiya va texnik salohiyatini ichma-ich baholash, yetti viloyatda yaroqli maydonlarning tarmoq mavjudligini dastlabki skrining qilish hamda viloyatlarning barqaror navbatligini aniqlash.

Usullari: 2001–2025-yillar uchun ochiq ma'lumotlar (ERA5-Land, Copernicus DEM GLO-30, ESA WorldCover, WDPa, OpenStreetMap) 100 m li to'rda qayta ishlandi. Yalpi salohiyat ufq soyasi va yonbag'irlar ekspozitsiyasini hisobga olgan holda, texnik salohiyat pvlb asosidagi soatlik model bilan uchta chiqarib tashlash stsenariysi bo'yicha, tarmoq mavjudligi esa elektr uzatish liniyalarigacha bo'lgan masofa bo'yicha baholandi. Beshta ko'rsatkich bo'yicha viloyatlar reytingi 20 ta qo'yilishda va tasodifiy vazn to'plamlarida tekshirildi.

Natijalar: Quyosh radiatsiyasining yalpi salohiyati yiliga 351,8 ming TVt-soatni tashkil etdi (ufq soyasi va yonbag'irlar ekspozitsiyasi hisobga olinganda 331,0 ming TWh). Joylashtirish zichligi 70 MW/km² (DC) bo'lganda texnik salohiyat chiqarib tashlash stsenariysiga qarab yiliga 688 dan 10 437 TVt-soatgacha o'zgaradi. Maydoni kamida 1 km² bo'lgan tutash uchastkalar umumiy maydonining 45,6% i elektr uzatish liniyasidan 5 km gacha masofada joylashgan. Dastlabki o'rganish uchun eng yuqori ustuvorlikka Issiqko'l, Osh, Botken va Norin viloyatlari ega.

Kalit so'zlar: Quyosh energetikasi salohiyati, yalpi quyosh radiatsiyasi, ERA5-Land, tarmoqqa ulangan fotoelektr stansiyalar, tarmoq mavjudligi skriningi, ko'p mezonli reyting, Qirg'iz Respublikasi.

Комплексная оценка потенциала солнечной энергетики Кыргызской Республики с учётом радиационных, территориальных и инфраструктурных факторов

Эргашали Ю. Рахимов^{1,a}, Нилюфар Р. Аvezова², Идирибек Г. Кенжаев³,
Жанболот Ж. Турсунбаев⁴

^{1,a} DSc, с.н.с., Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 100052, Toshkent, O'zbekiston; eyurakhimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7128-4598>.

² DSc, проф., Ферганский политехнический институт, 150107, Фергана, Узбекистан; avezovanr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>.

³ DSc, проф., Ошский государственный университет, 723500, Ош, Кыргызская Республика; kenjaevig@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8094-2553>.

⁴ PhD, доц., Ошский технологический университет, 723503, Ош, Кыргызская Республика; jhanbolot.72@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-8465-7879>.

Актуальность: Кыргызская Республика обладает значительным ресурсом солнечной радиации, однако её электроэнергетика опирается преимущественно на гидрогенерацию, а зимний пик нагрузки совпадает с сезонным минимумом речного стока. Остаётся нерешённой задача согласованной вложенной оценки потенциала, в которой уровни рассчитаны по единой сетке и периоду, а сравнение областей проверено на устойчивость.

Цель: получение вложенных оценок валового радиационного и технического потенциала сетевых фотоэлектрических станций, предварительный скрининг сетевой доступности пригодных площадок семи

For citation: Raximov E.Yu., Avezova N.R., Kenjayev I.G., Tursunbayev J.J. Integrated Assessment of the Solar Energy Potential of the Kyrgyz Republic with Account of Radiation, Land and Infrastructure Factors. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 183-194.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23481263>

Received: 18.04.2026

Revised: 11.05.2026

Accepted: 16.06.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Ergashali Yu. Rakhimov, Nilufar R. Avezova, Idirisbek G. Kenjaev, Zhanbolot J. Tursunbaev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



областей и определение устойчивой очерёдности областей.

Методы: открытые данные за 2001–2025 гг. (ERA5-Land, Copernicus DEM GLO-30, ESA WorldCover, WPA, OpenStreetMap) обработаны на сетке 100 м. Валовой потенциал рассчитан с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов, технический – по трём сценариям исключений с часовой моделью выработки на основе pvlib, сетевая доступность – по расстоянию до линий электропередачи. Рейтинг областей по пяти показателям проверен в 20 постановках и на случайных наборах весов.

Результаты: Валовой потенциал солнечной радиации составил 351,8 тыс. ТВт·ч в год (331,0 тыс. ТВт·ч с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов). Технический потенциал всей технически пригодной площади при плотности размещения 70 МВт/км² (DC) изменяется от 688 до 10 437 ТВт·ч в год в зависимости от сценария исключений. Для связанных участков площадью не менее 1 км² в пределах 5 км от линии электропередачи расположено 45,6% их суммарной площади. Наиболее высокий приоритет предварительного изучения имеют Иссык-Кульская, Ошская, Баткенская и Нарынская области.

Ключевые слова: Потенциал солнечной энергетики, суммарная солнечная радиация, ERA5-Land, сетевые фотоэлектрические станции, скрининг сетевой доступности, многокритериальное ранжирование, Кыргызская Республика.

Integrated Assessment of the Solar Energy Potential of the Kyrgyz Republic with Account of Radiation, Land and Infrastructure Factors

Ergashali Yu. Rakhimov^{1a}, Nilufar R. Avezova², Idrisbek G. Kenzhaev³, Zhanbolot J. Tursunbaev⁴

^{1a} DSc, senior researcher, Hydrometeorological Research Institute, 100052, Tashkent, Uzbekistan; eyurakhimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7128-4598>.

² DSc, prof., Fergana Polytechnic Institute, 150107, Fergana, Uzbekistan; avezovanr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>.

³ DSc, prof., Osh State University, 723500, Osh, Kyrgyz Republic; kenjaevig@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8094-2553>.

⁴ PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Osh Technological University, 723503, Osh, Kyrgyz Republic; jhanbolot.72@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8465-7879>.

Relevance: The Kyrgyz Republic has a significant solar radiation resource, but its power sector relies mainly on hydropower, and the winter load peak coincides with the seasonal minimum of river flow. A consistent nested assessment of the potential, with all levels calculated on a single grid and period and a robustness-tested comparison of oblasts, is still lacking.

Aim: To obtain nested estimates of the gross radiation and technical potential of grid-connected photovoltaic plants, to screen grid access of suitable sites in the seven oblasts and to determine a robust priority order of the oblasts.

Methods: Open data for 2001–2025 (ERA5-Land, Copernicus DEM GLO-30, ESA WorldCover, WPA, OpenStreetMap) were processed on a 100 m grid. The gross potential accounts for horizon shading and slope aspect; the technical potential was estimated under three exclusion scenarios with an hourly pvlib-based yield model; grid access was screened by the distance to power lines. The ranking of the oblasts by five indicators was tested in 20 formulations and under random weight sets.

Results: The gross solar radiation potential amounts to 351.8 thousand TWh per year (331.0 thousand TWh with horizon shading and slope aspect). At a placement density of 70 MW/km² (DC), the technical potential ranges from 688 to 10,437 TWh per year depending on the exclusion scenario. Among contiguous sites of at least 1 km², 45.6% of their total area lies within 5 km of a power line. The Issyk-Kul, Osh, Batken and Naryn oblasts form the group of highest priority for preliminary investigation.

Key words: Solar energy potential, global horizontal irradiation, ERA5-Land, grid-connected photovoltaic plants, grid-access screening, multi-criteria ranking, Kyrgyz Republic.

1. Введение (Introduction)

Кыргызская Республика обладает значительным ресурсом солнечной радиации, однако её электроэнергетика опирается преимущественно на гидрогенерацию, а зимний пик нагрузки совпадает с сезонным минимумом речного стока [1, 2]. Солнечная генерация может вносить вклад в диверсификацию структуры генерации, однако количественная оценка её участия в покрытии зимнего дефицита требует совместного анализа почасовых профилей выработки, электропотребления и гидрогенерации и в настоящей работе не выполнялась. Развитие солнечной энергетики требует обоснованной оценки потенциала. В литературе потенциал принято разделять на вложенные уровни: валовой (энергия солнечной радиации, поступающей на территорию), географический и технический (с учётом земель и технологии), экономический и реализуемый [3, 4, 5]. Для республики имеются карты ресурса Global Solar Atlas [6] и оценка

пригодности земель IRENA [7]. Первые не учитывают ограничения землепользования и сети, а вторая основана на индексе пригодности и не содержит расчёта выработки. Остаётся нерешённой задача согласованной вложенной оценки, в которой уровни рассчитаны по единой сетке и периоду, а сравнение областей проверено на устойчивость к субъективным решениям исследователя, то есть к набору показателей и весов.

В связи с этим цель настоящей исследовательской работы состоит в получении вложенных оценок валового радиационного и технического потенциала сетевых фотоэлектрических станций (СФЭС), а также в предварительном скрининге сетевой доступности пригодных площадок для семи областей Кыргызской Республики по открытым данным за 2001–2025 гг. и в определении устойчивой очередности областей по принятому набору критериев. Рассмотрены следующие задачи:

- рассчитать валовой потенциал солнечной радиации с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов и сопоставить расчётные годовые суммы радиации и удельную выработку с данными PVGIS-ERA5 в репрезентативных точках для контроля согласованности расчётов;
- определить диапазон технического потенциала по трём сценариям исключений;
- оценить долю площади пригодных участков, расположенных вблизи линий электропередачи;
- построить рейтинг областей и проверить его устойчивость к набору показателей и весов.

2. Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование построено как вложенная последовательность из четырёх уровней оценки, каждому из которых соответствует отдельный подраздел (Рис. 1): валовой потенциал солнечной радиации (п. 2.2), технический потенциал (п. 2.3), предварительный скрининг сетевой доступности (п. 2.4) и многокритериальное ранжирование областей (п. 2.5). Исходные данные и единая расчётная основа описаны в п. 2.1.

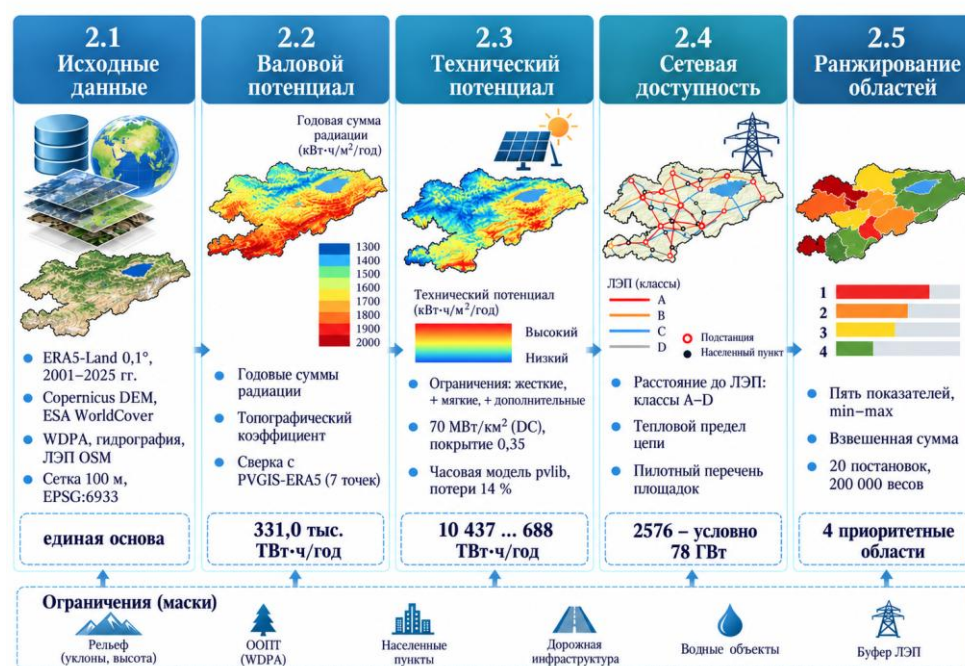


Рис. 1. Структурная схема исследования: вложенные уровни оценки потенциала солнечной энергетики.

Fig. 1. Structural flowchart of the study: nested levels of the solar energy potential assessment.

2.1. Данные и расчётная основа

В настоящем исследовании использованы почасовые данные ERA5-Land (нисходящее коротковолновое излучение, температура и ветер, шаг 0,1°) за 2001–2025 гг. [8], цифровая модель рельефа Copernicus DEM GLO-30 [9], земной покров ESA WorldCover [10], охраняемые территории WDPA [11], гидрография HydroLAKES и HydroRIVERS [12, 13], линии электропередачи OpenStreetMap [14] и границы GADM [15]. При этом необходимо отметить, что пространственное разрешение исходных данных существенно различается: радиационное поле ERA5-Land задано с шагом 0,1° (около 8–11 км), цифровая модель рельефа – 30 м, маски земного



покрова – 10 м. Площади и мощности рассчитывались на сетке 100 м в равновеликой проекции EPSG:6933 [16]. Перенос радиационных полей на эту расчётную сетку не повышает исходную климатическую разрешающую способность до 100 м, поэтому детализация масок землепользования не отождествляется с разрешением радиационного поля.

2.2. Валовой потенциал солнечной радиации

Как известно валовой потенциал солнечной радиации области r определяется суммированием средней многолетней годовой суммы суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, $\bar{H}_i$ по ячейкам площадью A_i :

$$E_r^{\text{вал}} = \sum_{i \in r} \bar{H}_i A_i, \quad (1)$$

Влияние рельефа учитывается топографическим коэффициентом K_i , рассчитанным по горизонту затенения и углам падения прямого излучения на наклонную поверхность склона [17, 18], которая учитывает как затенение местным горизонтом, так и изменение геометрии приёма радиации на склоне, поэтому скорректированная величина относится не к горизонтальной, а к наклонной естественной поверхности и обозначается отдельно. Валовой потенциал с учётом рельефа и средний по области коэффициент κ_r равны

$$GHI_i^{\text{рел}} = K_i GHI_i^{\text{гор}}, \quad E_r^{\text{вал,рел}} = \sum_{i \in r} \bar{H}_i K_i A_i, \quad \kappa_r = \frac{E_r^{\text{вал,рел}}}{E_r^{\text{вал}}}. \quad (2)$$

Топографическая поправка применялась к карте радиационного ресурса, но не к часовой модели выработки СФЭС (п. 2.3), которая рассчитана по исходным полям ERA5-Land. Данная методическая асимметрия ограничивает прямое сопоставление карты ресурса и расчётной выработки и обсуждается в разделе 4. Рассчитанные годовые суммы солнечной радиации и удельная выработка сопоставлены с данными PVGIS-ERA5 в семи репрезентативных точках [19]. Поскольку оба продукта опираются на один и тот же реанализ ERA5, такое сопоставление характеризует согласованность процедур обработки, а не независимую оценку погрешности относительно наземных измерений.

2.3. Технический потенциал

Изучаемая территория, непригодная для размещения станций, исключалась по трём вложенным сценариям, которые различаются составом ограничений: сценарий жёстких ограничений (англ. hard), сценарий жёстких и мягких ограничений (hard + soft) и сценарий с дополнительными ограничениями (hard + soft + extra). Жёсткие ограничения включают деревья, пашни, застройку, снег и лёд, воду и болота по WorldCover, буферы вокруг застройки (200 м) и воды (100 м), склоны круче 15°, высоты более 3500 м и охраняемые территории категорий I–IV с буфером 500 м. Мягкие ограничения дополнительно исключают кустарники, луга и пастбища, склоны круче 10° и категории V–VI, а дополнительные – класс «мхи и лишайники». Сценарии образуют вложенный диапазон, а не слагаемые. Мощность и выработка рассчитывались по следующим выражениям:

$$P_r^{\text{техн}} = \rho_p \sum_{\substack{p \in r, \\ A_p \geq A_{\min}}} A_p, \quad E_r^{\text{техн}} = 10^{-3} \sum_{\substack{p \in r, \\ A_p \geq A_{\min}}} P_p Y_{f,p}, \quad (3)$$

где ρ_p – плотность размещения, принятая равной 70 МВт/км² по мощности модулей (DC) в расчёте на полную площадь участка при коэффициенте покрытия поверхности модулями 0,35, что учитывает межрядные расстояния, внутренние проезды и технологические площадки, Y_f – удельная годовая выработка.

Расчётные совокупности различаются порогом минимальной площади: технический потенциал области определялся по всей технически пригодной площади сценария, а показатели отдельных площадок – по связным участкам площадью не менее 1 км². Дополнительно выделено подмножество участков, прошедших фильтры по удалённости от дорог и линий электропередачи (пилотный перечень). Фильтр минимальной площади влияет только на перечень площадок и не изменяет региональных сумм технического потенциала, поэтому все три совокупности далее приводятся раздельно. Чувствительность результатов к плотности размещения оценивалась в диапазоне 50–90 МВт/км². Выработка получена по часовой модели на основе pvlib [20] (разложение Эрбса, транспозиция Перес, температура Файман, PVWatts, потери 14%) [21, 22, 23] по исходным полям ERA5-Land без топографической поправки.

2.4. Скрининг сетевой доступности

В настоящей исследовании из-за отсутствия данных системного оператора выполнен



предварительный скрининг сетевой доступности по расстоянию d_p от участка до ближайшей линии электропередачи. Участки делились на классы А (до 1 км), В (1–5 км), С (5–15 км) и D (свыше 15 км), а классы А и В отнесены к категории «вблизи сети». Ориентировочный тепловой предел одной цепи оценивался по допустимому току $I^{\text{доп}}$ и классу напряжения U и определяется следующим образом:

$$S_{\text{тепл}} = \sqrt{3} U I^{\text{доп}} \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Таким образом полученные значения не являются мощностью, допустимой к присоединению, так как для её определения необходимы сведения о конфигурации сети, пропускной способности узлов и трансформаторов, текущих нагрузках, а также о режимных и аварийных (N–1) ограничениях. Кроме того, несколько отобранных участков могут относиться к одной и той же линии, поэтому суммирование их индивидуальных ограничений способно приводить к повторному учёту одной и той же сетевой пропускной способности. Соответствующие величины приводятся далее как условная агрегированная оценка при ограничении мощности каждого участка типовым тепловым пределом ближайшей линии.

2.5. Ранжирование областей

Рейтинг строился по пяти показателям: удельная выработка, площадь пригодных участков при жёстких ограничениях, зимняя доля годовой суммы солнечной радиации, доля площади участков в пределах 5 км от линий электропередачи и расстояние до дорог. Показатели нормировались методом min–max, а интегральная оценка вычислялась как взвешенная сумма с равными весами в базовом варианте:

$$S_r = \sum_{m=1}^M w_m \tilde{x}_{rm}, \quad \sum_{m=1}^M w_m = 1, \quad w_m \geq 0. \quad (5)$$

Равенство весов принято экспертно и не отражает каких-либо инвестиционных предпочтений. Устойчивость проверялась в 20 постановках (иные веса, исключение показателей, пороги сети, методы TOPSIS [24], Борда, z-оценок и геометрического среднего), на 200 000 случайных наборах весов [25, 26] и по коэффициенту Кендалла τ [27]. Случайное варьирование весов характеризует чувствительность принятой модели ранжирования, а не вероятность успешной реализации инвестиционных проектов.

3. Результаты (Results)

3.1. Валовой потенциал солнечной радиации

Средняя многолетняя годовая сумма суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, за 2001–2025 гг. для республики Киргизистан составляет 1782 кВт·ч/м² и изменяется по областям от 1671 (Таласская) до 1868 кВт·ч/м² (Ошская), то есть на 11,8% (Табл. 1, Рис. 2). Валовой потенциал солнечной радиации республики равен 351,8 тыс. ТВт·ч в год, с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов – 331,0 тыс. ТВт·ч ($\kappa = 0,941$). Различия валового потенциала областей на 91,5% объясняются их площадью, поэтому валовой интеграл непригоден для сравнения областей по качеству ресурса. Годовой ход имеет минимум в декабре, на ноябрь–февраль приходится 17,8–19,2% годовой суммы радиации, которая характеризует внутригодовое распределение ресурса и не равнозначна доле зимней выработки СФЭС. Средняя абсолютная разность относительно PVGIS-ERA5 составила 1,0% по годовым суммам радиации и 1,9% по удельной выработке, что отражает согласованность расчётных процедур при общем источнике метеорологических данных, а не погрешность относительно наземных измерений.

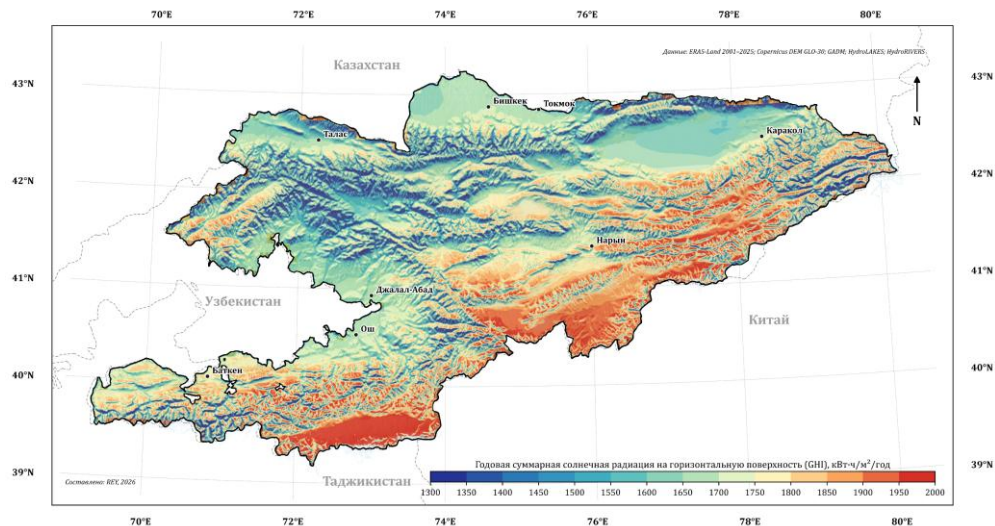


Рис. 2. Средняя многолетняя годовая сумма суммарной солнечной радиации с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов (на наклонную естественную поверхность), кВт·ч/м² (ERA5-Land, 2001–2025).

Fig. 2. Long-term mean annual global solar irradiation with account of horizon shading and slope aspect (on the inclined natural surface), kWh/m² (ERA5-Land, 2001–2025).

Табл. 1. Сравнительная оценка солнечного энергетического потенциала областей Кыргызской Республики по результатам ранжирования

Tab. 1. Comparative assessment of the solar energy potential of the oblasts of the Kyrgyz Republic based on the ranking results

Область	$\bar{H}_r$, кВт·ч/м ²	$E^{\text{вал}}$, тыс. ТВт·ч/год	Пригодная площадь, жёсткие, км ²	$E^{\text{техн}}$, жёсткие, ТВт·ч/год	$E^{\text{техн}}$, + мягкие, ТВт·ч/год	g – доля площади у сети, %	Место
Иссык-Кульская	1779	75,2	11 547	1451	268	55,6	1
Ошская	1868	54,4	11 644	1483	71	43,8	2
Баткенская	1820	30,0	7099	858	121	74,8	3
Нарынская	1828	82,4	23 632	3043	385	29,9	4
Чуйская	1687	33,2	7619	913	66	45,0	5
Джалал-Абадская	1723	57,3	16 866	1980	69	48,3	6
Таласская	1671	19,0	6094	709	43	51,7	7

На Табл.1 представлены результаты расчетов по сравнительной оценки солнечного энергетического потенциала областей Кыргызской Республики по результатам ранжирования и на этой основе показатели областей, упорядоченные по месту в рейтинге: годовая сумма суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность $\bar{H}_r$ (кВт·ч/м²), валовой потенциал солнечной радиации $E^{\text{вал}}$ (тыс. ТВт·ч в год), технически пригодная площадь при жёстких ограничениях (км²), технический потенциал всей пригодной площади $E^{\text{техн}}$ (ТВт·ч в год, 70 МВт/км²), доля площади связанных участков не менее 1 км² в пределах 5 км от ЛЭП g (%).

3.2. Технический потенциал

Технически пригодная территория республики Киргизистан составляет 84 504 км² (42,8% площади республики) при жёстких ограничениях, 8089 км² (4,1%) при жёстких и мягких и 5466 км² (2,8%) при дополнительных (Табл. 2, Рис. 3). Технический потенциал всей пригодной площади при плотности 70 МВт/км² (DC) равен 10 437 ТВт·ч в год (5915 ГВт) в сценарии жёстких ограничений и 688 ТВт·ч (383 ГВт) в сценарии с дополнительными ограничениями, то есть различие достигает 15,2 раза. Фильтр минимального размера выделяет при жёстких ограничениях 2612 связанных участков площадью не менее 1 км² общей площадью 80 795 км² (95,6% пригодной площади), которым соответствует 5656 ГВт и 10 125 ТВт·ч в год, или 97,0% технической выработки; все дальнейшие показатели уровня участков относятся именно к этой совокупности. Удельная выработка составляет в среднем 1764–1803 кВт·ч/кВт, межгодовая

изменчивость не превышает 2,3%. Изменение плотности размещения в диапазоне 50–90 МВт/км² изменяет оценки мощности и выработки пропорционально, в пределах –28,6...+28,6%. При ужесточении ограничений потенциал концентрируется в Нарынской, Иссык-Кульской и Баткенской областях (эффективное число областей снижается с 5,6 до 3,6), причём крупных участков при мягких сценариях не остаётся. Выделен пилотный перечень из 638 площадок площадью 4675 км² (327 ГВт и 583 ТВт·ч в год), прошедших дополнительно фильтры по удалённости от дорог и линий электропередачи.

Табл. 2. Технический потенциал республики для всей технически пригодной площади по сценариям ограничений при плотности размещения 70 МВт/км² (DC)

Tab. 2. Technical potential of the republic for the entire technically suitable area by constraint scenario at a placement density of 70 MW/km² (DC)

Сценарий	Площадь, км ²	Доля территории, %	$P_{\text{техн}}$, ГВт (DC)	$E_{\text{техн}}$, ТВт·ч в год
жёсткие	84 504	42,8	5915	10 437
+ мягкие	8089	4,1	566	1021
+ дополнительные	5466	2,8	383	688

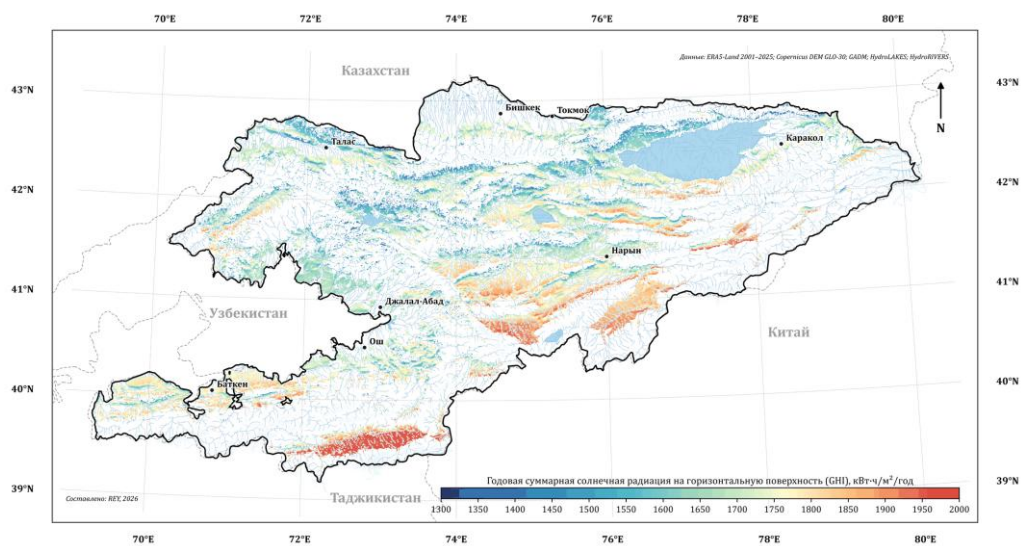


Рис. 3. Годовая сумма суммарной солнечной радиации на территориях, технически пригодных для размещения СФЭС (жёсткие ограничения).

Fig. 3. Annual global solar irradiation over the areas technically suitable for siting grid-connected PV plants (hard constraints).

3.3. Предварительный скрининг сетевой доступности

К классам А и В относятся 774 из 2612 связанных участков, выделенных при жёстких ограничениях, общей площадью 36 804 км², то есть 45,6% суммарной площади этих участков (80 795 км²), что соответствует индикативной мощности 2576 ГВт и выработке 4588 ТВт·ч в год, или 44,0% технической выработки сценария (рис. 4). Непосредственно у линий (класс А, до 1 км) расположено лишь 9,0% площади, тогда как на класс С (5–15 км) приходится 40,1%, для которого присоединение требует строительства отдельной линии. Наиболее обеспечены Баткенская (74,8%) и Иссык-Кульская (55,6%) области, наименее – Нарынская (29,9%), где наибольший технический потенциал сочетается с наихудшей сетевой доступностью. Показатель чувствителен к порогу расстояния и составляет 9,0, 45,6 и 85,6% при порогах 1, 5 и 15 км. В условном скрининговом расчёте, где мощность каждого участка отдельно ограничивается типовым тепловым пределом ближайшей линии, сумма индикативных мощностей участков вблизи сети уменьшается с 2576 до 78 ГВт (около 3,0%). Это значение не следует отождествлять с фактической свободной пропускной способностью сети или технически допустимой суммарной мощностью присоединения, оно указывает лишь на то, что присоединение крупных площадок потребует развития сетевой инфраструктуры.

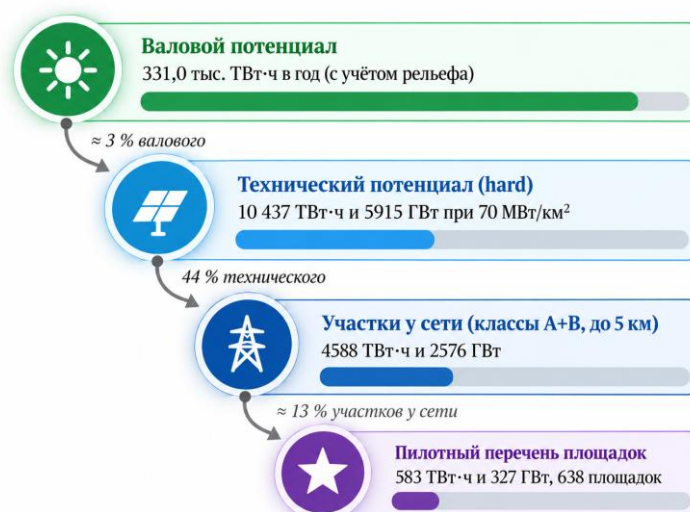


Рис. 4. Каскад уровней потенциала при жёстких ограничениях (70 МВт/км^2 , DC): от валового радиационного ресурса к технически пригодной площади, связным участкам не менее 1 км^2 и участкам вблизи линий электропередачи (длина полос показана в логарифмическом масштабе).
Fig. 4. Cascade of potential levels under hard constraints (70 MW/km^2 , DC): from the gross radiation resource to the technically suitable area, contiguous sites of at least 1 km^2 and sites near power lines (bar length is shown on a logarithmic scale).

3.4. Рейтинг областей

При равных весах первое место занимает Иссык-Кульская область (0,670), за ней следуют Ошская (0,645) и Баткенская (0,643), причём разрыв между вторым и третьим местами составляет всего 0,002, затем Нарынская (0,609). Чуйская (0,417), Джалал-Абадская (0,210) и Таласская (0,197) области образуют группу низкого приоритета по принятым критериям (Табл. 3, Рис. 5). Коэффициент Кендалла относительно базового рейтинга в 20 постановках составил 0,52–1,00. Состав первой четвёрки сохраняется в 68% случайных наборов весов, где частота занятия мест 1–4 при заданном распределении случайных весов и неизменных исходных показателях равна 100, 99, 94 и 75% для Иссык-Кульской, Ошской, Баткенской и Нарынской областей. Полученные величины характеризуют устойчивость принятой модели ранжирования, а не вероятность успешной реализации проектов, а различие между тремя первыми областями статистически не выражено. Порядок внутри четвёрки определяется весом показателя сетевой доступности, в которой Нарынская область уступает Ошской и Иссык-Кульской при весе сети около 0,10–0,12 и Баткенской при 0,17, а Чуйская обгоняет её лишь при весе выше 0,49.

Табл. 3. Места областей в базовых постановках, интервалы мест по 20 постановкам, ожидаемое место $\bar{k}_r$ и частота занятия мест 1–4 при случайном варьировании весов

Tab. 3. Ranks of the oblasts in the baseline formulations, rank intervals over 20 formulations, expected rank $\bar{k}_r$ and frequency of occupying ranks 1–4 under random weight variation

Область	Равные	Вариант	Интервал (2 набора)	Интервал (20 сценариев)	Ожидаемое место $\bar{k}_r$	Частота мест 1–4 при случайных весах, %
Иссык-Кульская	1	2	1–2	1–3	2,22	100
Ошская	2	4	2–4	2–4	2,57	99
Баткенская	3	1	1–3	1–5	2,72	94
Нарынская	4	3	3–4	1–5	3,02	75
Чуйская	5	5	5	4–6	4,84	26
Джалал-Абадская	6	6	6	5–7	6,24	5
Таласская	7	7	7	6–7	6,39	1

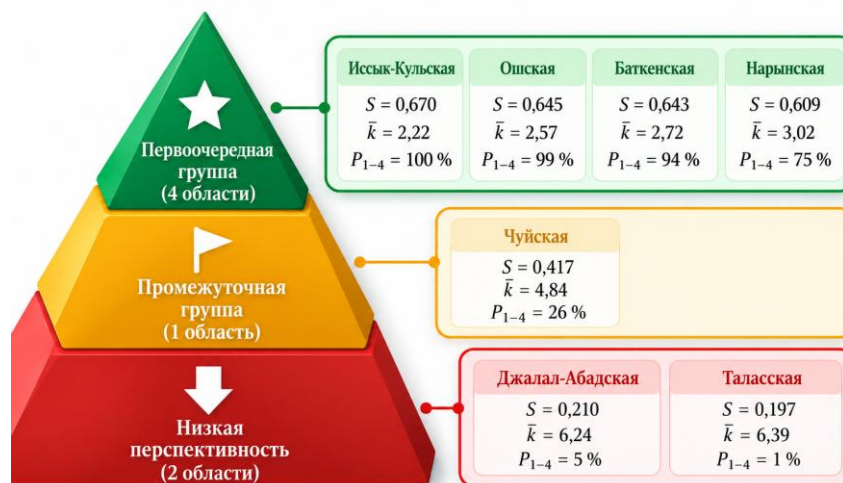


Рис. 5. Группировка областей: оценка S при равных весах, ожидаемое место $\bar{k}$ и частота P_{1-4} занятия мест 1–4 при случайном варьировании весов.

Fig. 5. Grouping of the oblasts: score S under equal weights, expected rank $\bar{k}$ and frequency P_{1-4} of occupying ranks 1–4 under random weight variation.

4. Обсуждение (Discussion)

Главный результат настоящей исследования состоит в том, что неопределённость технического потенциала носит преимущественно структурный характер, в который выбор сценария ограничений изменяет оценку в 15,2 раза (переход от жёстких ограничений к жёстким и мягким даёт $-90,2\%$ по выработке), тогда как плотность размещения в диапазоне 50–90 МВт/км² даёт $-28,6\ldots+28,6\%$, системные потери при 14 ± 3 п.п. – $\mp 3,5\%$, расхождение годовых сумм радиации с PVGIS-ERA5 – $\pm 1,1\%$ (RMSE), а замена модели выработки PVWatts на De Soto – лишь $-0,04\ldots-0,28\%$. Причина в том, что правила землепользования меняют саму площадь, входящую в расчёт множителем, тогда как радиационные и технологические параметры влияют только на удельную выработку. Поэтому потенциал следует приводить диапазоном, а не одним числом. Площадь при наиболее строгом сценарии (5466 км²) превышает площадь хорошей пригодности по оценке IRENA (3645 км²) [7]. Эти величины получены разными методиками – масками исключений и многокритериальным индексом пригодности, – поэтому их сопоставление позволяет оценить порядок величин, но не подтверждает точность предлагаемого подхода. Принятая плотность 70 МВт/км² (мощность модулей DC, отнесённая к полной площади участка при коэффициенте покрытия 0,35) почти вдвое выше следующей из данных IRENA (около 25 МВт/км²), что объясняет основную часть расхождения по мощности. А для горных ландшафтов с ограниченной доступностью микрзон более обоснованной может оказаться нижняя часть рассмотренного диапазона 50–90 МВт/км². Зоны высшей пригодности по IRENA расположены на юге Ошской области, что согласуется с максимальными годовыми суммами радиации этой области и её вторым местом в рейтинге.

Отметим, что практически важен «парадокс Нарынской области», где наибольший технический потенциал не означает первого места, поскольку присоединение требует значительных сетевых вложений, что подчёркивает ценность комплексной оценки, в которой ресурс, земли и сеть рассматриваются совместно. Устойчивыми к принятым допущениям оказываются состав первоочередной группы областей и вывод о структурном характере неопределённости. Условными остаются конкретные значения потенциала, внутренний порядок группы и агрегированные сетевые величины.

В этой связи неопределённость результатов целесообразно разделить на три составляющие. Первая – неопределённость радиационной базы: сверка выполнена только с PVGIS-ERA5, основанном на том же реанализе, поэтому систематическая ошибка реанализа в условиях сложного рельефа количественно не установлена и требует проверки по наземным актинометрическим данным [28]; топографическая поправка применена к карте ресурса, но не к модели выработки, что дополнительно ограничивает их прямое сопоставление. Вторая – структурная неопределённость земельных масок, преобладающая по величине; земельный кадастр и опасные геологические участки в масках не учтены. Третья – неопределённость инфраструктурной оценки: сетевая доступность оценена скринингом по расстоянию без данных



системного оператора, расчёта режимов и критерия N–1, данные OpenStreetMap о линиях неполны, допустимые токи приняты по типовым маркам проводов, а возможное отнесение нескольких участков к одной линии не учитывалось. Следующими шагами являются запрос данных системного оператора для приоритетных областей, расчёт нормальных и аварийных режимов, а также экономическая оценка.

5. Заключение (Conclusion)

1. Валовой потенциал солнечной радиации республики Киргизистан составляет 351,8 тыс. ТВт·ч в год (331,0 тыс. ТВт·ч с учётом затенения горизонтом и экспозиции склонов), а различия между областями на 91,5% определяются их площадью, а не качеством ресурса.

2. Технический потенциал всей технически пригодной площади при плотности 70 МВт/км² (DC) изменяется от 688 до 10 437 ТВт·ч в год в зависимости от сценария ограничений, а для 2612 связанных участков площадью не менее 1 км², выделенных при жёстких ограничениях, составляет 5656 ГВт и 10 125 ТВт·ч в год (97,0% технической выработки).

3. В пределах 5 км от линий электропередачи расположено 45,6% суммарной площади связанных участков, выделенных при жёстких ограничениях, что соответствует 44,0% технической выработки. В условном скрининговом расчёте, где мощность каждого участка ограничивается типовым тепловым пределом ближайшей линии, сумма индикативных мощностей уменьшается до 3,0% исходной, что указывает на необходимость развития сетевой инфраструктуры.

4. В рамках выбранных пяти критериев и рассмотренных сценариев весовых коэффициентов наиболее высокий приоритет предварительного изучения имеют Иссык-Кульская, Ошская, Баткенская и Нарынская области, в которых внутренний порядок группы чувствителен к важности сетевой доступности.

Таким образом полученные результаты задают диапазоны потенциала и приоритеты для запроса данных системного оператора, необходимых для оценки собственно допустимой к присоединению мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA. Strengthening Power System Security in Kyrgyzstan: A Roadmap. – Paris: IEA, 2022.
2. Hirth L. The market value of variable renewables: The effect of solar and wind power variability on their relative price // *Energy Economics*. – 2013. – Vol. 38. – P. 218–236.
3. Hoogwijk M., de Vries B., Turkenburg W. Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy // *Energy Economics*. – 2004. – Vol. 26, № 5. – P. 889–919.
4. Resch G., Held A., Faber T., Panzer C., Toro F., Haas R. Potentials and prospects for renewable energies at global scale // *Energy Policy*. – 2008. – Vol. 36, № 11. – P. 4048–4056.
5. Lopez A., Roberts B., Heimiller D., Blair N., Porro G. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. NREL/TP-6A20-51946. – Golden, CO: NREL, 2012. – 40 p.
6. World Bank, ESMAP. Global Solar Atlas 2.0: Technical Report. – Washington, DC: World Bank, 2020.
7. IRENA. Renewables Readiness Assessment: The Kyrgyz Republic. – Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.
8. Muñoz-Sabater J. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. – 2021. – Vol. 13. – P. 4349–4383.
9. European Space Agency, Airbus. Copernicus DEM – Global Digital Elevation Model (GLO-30). – 2022.
10. Zanaga D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. – 2022. – DOI: 10.5281/zenodo.7254221.
11. UNEP-WCMC, IUCN. Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA). – Cambridge, UK, 2024.
12. Messager M.L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – Art. 13603.
13. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. – 2013. – Vol. 27, № 15. – P. 2171–2186.
14. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap data (ODbL). – URL: <https://www.openstreetmap.org>.
15. Hijmans R.J. et al. GADM: Database of Global Administrative Areas, version 4.1. – 2022. – URL: <https://gadm.org>.



16. Brodzik M.J., Billingsley B., Haran T., Raup B., Savoie M.H. EASE-Grid 2.0: Incremental but significant improvements for Earth-gridded data sets // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2012. – Vol. 1, № 1. – P. 32–45.
17. Dubayah R., Rich P.M. Topographic solar radiation models for GIS // *International Journal of Geographical Information Systems*. – 1995. – Vol. 9, № 4. – P. 405–419.
18. Šúri M., Hofierka J. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments // *Transactions in GIS*. – 2004. – Vol. 8, № 2. – P. 175–190.
19. Huld T., Müller R., Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa // *Solar Energy*. – 2012. – Vol. 86. – P. 1803–1815.
20. Holmgren W.F., Hansen C.W., Mikofski M.A. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems // *Journal of Open Source Software*. – 2018. – Vol. 3, № 29. – P. 884.
21. 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*. – 1982. – Vol. 28, № 4. – P. 293–302.
22. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance // *Solar Energy*. – 1990. – Vol. 44, № 5. – P. 271–289.
23. Faïman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. – 2008. – Vol. 16. – P. 307–315.
24. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – Berlin: Springer, 1981. – 259 p.
25. Lahdelma R., Hokkanen J., Salminen P. SMAA – Stochastic multiobjective acceptability analysis // *European Journal of Operational Research*. – 1998. – Vol. 106, № 1. – P. 137–143.
26. Tervonen T., Lahdelma R. Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 178, № 2. – P. 500–513.
27. Kendall M.G. A new measure of rank correlation // *Biometrika*. – 1938. – Vol. 30, № 1–2. – P. 81–93.
28. Urraca R., Huld T., Gracia-Amillo A., Martinez-de-Pison F.J., Kaspar F., Sanz-Garcia A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data // *Solar Energy*. – 2018. – Vol. 164. – P. 339–354.

REFERENCES

1. IEA. Strengthening Power System Security in Kyrgyzstan: A Roadmap. Paris, IEA, 2022.
2. Hirth L. The market value of variable renewables: The effect of solar and wind power variability on their relative price. *Energy Economics*, 2013, vol. 38, pp. 218–236.
3. Hoogwijk M., de Vries B. and Turkenburg W. Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy. *Energy Economics*, 2004, vol. 26, no. 5, pp. 889–919.
4. Resch G., Held A., Faber T., Panzer C., Toro F. and Haas R. Potentials and prospects for renewable energies at global scale. *Energy Policy*, 2008, vol. 36, no. 11, pp. 4048–4056.
5. Lopez A., Roberts B., Heimiller D., Blair N. and Porro G. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. NREL/TP-6A20-51946. Golden, CO, NREL, 2012, 40 p.
6. World Bank, ESMAP. Global Solar Atlas 2.0: Technical Report. Washington, DC, World Bank, 2020.
7. IRENA. Renewables Readiness Assessment: The Kyrgyz Republic. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency, 2022.
8. Muñoz-Sabater J. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021, vol. 13, pp. 4349–4383.
9. European Space Agency, Airbus. Copernicus DEM – Global Digital Elevation Model (GLO-30). 2022.
10. Zanaga D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. 2022, doi: 10.5281/zenodo.7254221.
11. UNEP-WCMC, IUCN. Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA). Cambridge, UK, 2024.
12. Messager M.L., Lehner B., Grill G., Nedeva I. and Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 2016, vol. 7, art. 13603.
13. Lehner B. and Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 2013, vol. 27, no. 15, pp. 2171–2186.



14. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap data (ODbL). [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org>.
15. Hijmans R.J. et al. GADM: Database of Global Administrative Areas, version 4.1. 2022. [Online]. Available: <https://gadm.org>.
16. Brodzik M.J., Billingsley B., Haran T., Raup B. and Savoie M.H. EASE-Grid 2.0: Incremental but significant improvements for Earth-gridded data sets. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 32-45.
17. Dubayah R. and Rich P.M. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, vol. 9, no. 4, pp. 405-419.
18. Šúri M. and Hofierka J. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 175-190.
19. Huld T., Müller R. and Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 2012, vol. 86, pp. 1803-1815.
20. Holmgren W.F., Hansen C.W. and Mikofski M.A. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 2018, vol. 3, no. 29, p. 884.
21. Erbs D.G., Klein S.A. and Duffie J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 1982, vol. 28, no. 4, pp. 293-302.
22. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J. and Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 1990, vol. 44, no. 5, pp. 271-289.
23. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, vol. 16, pp. 307-315.
24. Hwang C.L. and Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin, Springer, 1981, 259 p.
25. Lahdelma R., Hokkanen J. and Salminen P. SMAA – Stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 1998, vol. 106, no. 1, pp. 137-143.
26. Tervonen T. and Lahdelma R. Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 2007, vol. 178, no. 2, pp. 500-513.
27. Kendall M.G. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 1938, vol. 30, no. 1-2, pp. 81-93.
28. Urraca R., Huld T., Gracia-Amillo A., Martinez-de-Pison F.J., Kaspar F. and Sanz-Garcia A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Solar Energy*, 2018, vol. 164, pp. 339-354.