

УДК 620.91:620.92:620.98

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-71-80

Оценка солнечных ресурсов Кыргызстана с использованием программы «Meteonorm»

Б.М. Максатов, Р.В. Пугачев, Г.В. Дерюгина

На территории Кыргызстана функционируют четыре актинометрические станции (АС), расположенные в северо-восточной части страны, по которым в открытых источниках отсутствует информация за последние 40 лет. Для оценки солнечных ресурсов в других регионах страны могут быть использованы базы данных (БД), основанные на математическом моделировании и результатах спутникового зондирования атмосферы и поверхности Земли. Среди разработанных глобальных и региональных БД в области солнечной энергетики в мире наиболее широко применяется швейцарская БД «Meteonorm», адекватность данных которой может быть проверена сравнением с данными актинометрических станций.

Проведено сравнение многолетней месячной солнечной радиации (СР) из БД «Meteonorm» с данными семи актинометрических станций Кыргызстана и соседних государств из двух доступных БД: мирового центра радиационных данных (WRDC) и научно-прикладного справочника по климату СССР (НПС). Кратко описаны рассмотренные БД. На основе результатов проведенного анализа показано, что наблюдается превышение значений в данных БД «Meteonorm» относительно данных, полученных от актинометрических станций из БД «WRDC» и БД «НПС». Более того, это превышение меняется не только внутри года, но и в зависимости от широты местности.

Анализ многолетней изменчивости суммарной СР по данным трех АС на территории соседних с Кыргызстаном государств из БД «WRDC» не выявил тенденции ее изменения.

Описаны использованные методы для разработанной математической модели восстановления среднесуточного годового и месячных значений суммарной СР по данным БД «Meteonorm» на территории Кыргызстана с учетом широты местности.

Приведен уточненный теоретический потенциал солнечной энергии Кыргызстана и показано, что по территории страны среднесуточный приход суммарной СР меняется незначительно: от 1656 до 1856 кВт·ч/м². Среднее значение составляет 1756 кВт·ч/м².

Ключевые слова: солнечная радиация, актинометрическая станция, специализированная база данных, математическая модель.

Для цитирования: Максатов Б.М., Пугачев Р.В., Дерюгина Г.В. Оценка солнечных ресурсов Кыргызстана с использованием программы «Meteonorm» // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 71—80. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-71-80.

Estimation of the Solar Resources in Kyrgyzstan Using the Meteonorm Computer Program

B.M. Maksatov, R.V. Pugachev, G.V. Deryugina

There are four actinometric stations (AS) in Kyrgyzstan located in the north-eastern part of the country, for which there is no information in open sources for the last 40 years. Databases (DBs) formed on the basis mathematical modeling and results of satellite sensing of the Earth's atmosphere and surface can be used to estimate the solar resources in the other regions of the country. Among the developed global and regional DBs in the field of solar energy, the Swiss Meteonorm DB is most widely used around the world, the adequacy of which can be verified by comparison with the data of actinometric stations. The long-term monthly solar radiation (SR) data contained in the Meteonorm DB are compared with the data of seven actinometric stations of Kyrgyzstan and neighboring countries from two available DBs: the World Radiation Data Center (WRDC) and the Scientific and Applied Reference Book on the Climate in the Soviet Union (SARB). The considered DBs are briefly described. It is shown based on the obtained analysis results that the values of data contained in the Meteonorm DB are higher than the data contained in the WRDC and SARB databases compiled using information from the actinometric stations. Moreover, this exceeding varies not only within the year, but also depending on the terrain latitude. An analysis of the long-term variability of the total SR according to the data of three ASs in the territory of countries neighboring with Kyrgyzstan from the WRDC DB has not revealed any trend of its change.

The methods used for the newly developed mathematical model to restore the long-term average annual and monthly values of the total SR in Kyrgyzstan from the Meteonorm DB with taking the terrain latitude into account are described.

An updated theoretical potential of solar energy in Kyrgyzstan is presented, and it is shown that the long-term average annual arrival of total solar energy varies insignificantly: from 1656 to 1856 kW·h/m². Its average value is 1756 kW·h/m².

Key words: solar radiation, actinometric station, dedicated database, mathematical model.

For citation: Maksatov B.M., Pugachev R.V., Deryugina G.V. Estimation of the Solar Resources in Kyrgyzstan Using the Meteonorm Computer Program. Bulletin of MPEI. 2020;4:71—80. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-71-80.

Описание исходных данных

Оценка солнечных ресурсов — один из первых и важнейших этапов разработки проектов энергетических гелиоустановок любого типа. Только достоверная оценка доступного ресурса позволяет принять верное техническое или экономическое решение. В настоящее время разработчикам и исследователям в области гелиоэнергетики доступны базы данных (БД), содержащие необходимую информацию. К ним относятся глобальные БД — «Мировой центр радиационных данных» (World Radiation Data Centre — WRDC) [1], швейцарская база данных «Meteonorm» [2], БД «NASA SSE» [3] и др. Также существуют региональные БД, и одна из которых использована в настоящей работе — БД «Научно-прикладной справочник по климату СССР» [4].

Применимость той или иной БД определяется географическим покрытием, доступностью и достоверностью данных. Наиболее надежными считаются данные наблюдений на актинометрических станциях. Из глобальных БД авторами взяты БД «WRDC» и «Meteonorm». Следует отметить, что «WRDC» — общедоступна, а «Meteonorm» — коммерческий проект. Основные сведения используемых в работе БД по солнечным ресурсам представлены в табл. 1.

База данных «НПС»

БД «НПС» разработана на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ». В ней представлена информация по 166 актинометрическим станциям по СР, полученная из «Научно-прикладного справочника по климату СССР» [4], осредненная за период с 1964 по 1980 гг., в том числе: приход СР (суммарной, прямой и диффузной) (в МДж и кВт·ч на 1 м²) на горизонтальную приемную площадку (п/пл) в виде часового прихода СР для среднемесячных суток каждого месяца среднемноголетнего года, среднемесячного суточного прихода СР и месячных сумм СР, среднемесячные коэффициенты отражательной способности поверхности — альbedo (о.е.), суточный приход СР на горизонтальную п/пл на грани-

це атмосферы Земли в космосе. Отбор любой из 166 базовых АС осуществляется по любому из 3 признаков: порядковому номеру АС в БД, названию или координатам АС. При задании расчётной точки A (φ , ψ), не совпадающей с данными АС, выполняется выбор ближайшей АС.

База данных «Meteonorm»

База разрабатывается и представляется швейцарской организацией Meteotest, расположенной в г. Берн и относящейся к Швейцарскому федеральному агентству энергетики (Swiss Federal Office of Energy). К настоящему времени известно несколько версий данной БД. Последняя версия программы — 7 представляет информацию более чем по 8325 метеостанциям, расположенным по всему миру, и пяти геостационарным спутникам за период с 1991 по 2010 гг. [2].

В 7 версии «Meteonorm» увеличено количество данных по СР для АС, расположенных по всему миру, по сравнению с 6 версией: с 8055 до 8325.

В целом в «Meteonorm» содержится информация о суммарной, прямой и диффузной СР, температуре среды, давлении, скорости ветра и его направленности, влажности воздуха. Но в основном она предназначена для инженерных расчетов в области солнечной энергетики и её приложений в любой точке Земли в пределах полярных кругов. В основном эти данные для $\Delta t = 1$ сутки, 1 месяц и 1 год. Также база позволяет моделировать значения прихода СР на горизонтальную п/пл в любой точке Земли в виде годового ряда часовых значений и даже минутных значений.

Достоверность генерированных данных по данным разработчика [2] такова: ошибки в интерполяции среднемесячных значений СР не превышают 8%, а по температуре среды — 1,9%.

Всемирный центр радиационных данных («WRDC»)

Мировой центр радиационных данных является научным подразделением ГГО им. Воейкова, выполняет

Таблица 1

Основные сведения используемых в работе БД по СР

База данных	Регион	Источник	Период наблюдений, г.	Доступность	Данные
«Meteonorm»	Весь мир	8325 точек: АС, 5 геостационарных спутников, модели	1980 — 1991 1991 — 2010	Программное обеспечение (платно)	Среднемесячные, генерируется ряд среднечасовых значений
«WRDC»		1195, из них 29 на территории РФ	1964 — н/в	Бесплатно	Ряды наблюдений суточных, месячных значений
«НПС»	Территория бывшей СССР	166 АС: 121 АС — РФ; 40 АС — республики бывшего СССР	1964 — 1980	Собственность кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ»	Среднемесячные и часовые

функции центра данных солнечной радиации, действует в соответствии с принятыми Росгидрометом обязательствами перед Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Представлена информация по 1195 актинометрическим станциям мира, из них на территории России — 29 станций, большая часть станций находится на территории стран Европы (на территории Франции — 105 АС, Италии — 44 АС).

В «WRDC» представлены следующие данные:

— продолжительности солнечного сияния за месяц и среднемесячная в часах;

— диффузная и суммарная солнечная радиации (за день, месяц) для нескольких лет наблюдений.

Вся информация приводится за все годы наблюдений, что позволяет оценить многолетнюю изменчивость поступления СР в отличие от «Meteonorm». Все сведения даны с указанием показателей качества данных, задающихся от 0 (достоверные) до 8 (ошибочные). Показатели солнечной радиации и радиационного баланса выражаются в Дж/см², продолжительность солнечного сияния — в часах, умноженных на 10. Значения могут быть преобразованы в Вт·ч /м² делением на 0,36.

Из доступных данных наземного наблюдения в БД «НПС» имеются среднемноголетние (за период с 1964 по 1980 гг.) месячные значения суммарной СР и ее составляющих (прямой, диффузной) на четырех актинометрических станциях Кыргызстана («Фрунзе», «Чолпон-Ата», «Суусамыр» и «Тянь-Шань»). Все АС расположены на северо-востоке страны, поэтому для некоторого представления о том, как меняется приход СР по территории Кыргызстана были проанализированы АС двух соседних государств: Республик Казахстан (АС «Аральское море») и Узбекистан (АС «Ташкент») (рис. 1). Существенный недостаток данных БД «НПС» — отсутствие общего периода осредненных данных с данными БД «Meteonorm» (см. табл. 1).

В «WRDC» нет данных наземного наблюдения на территории Кыргызстана, но имеется ряд наблюдений СР (1964 — 1991 гг.) на территории соседних государств: Республик Узбекистана (АС «Ташкент») и Казахстана (АС «Аральское море»), Китайской Народной

Республики (АС «Урумчи») (табл. 2), позволяющие получить осредненные данные по СР за общий период с данными БД «НПС» (1964 — 1980 гг.) и «Meteonorm» (1980 — 1991 гг.).

В качестве источника данных по СР в любой точке Кыргызстана выбрана БД «Meteonorm». В ней отсутствуют данные наземного наблюдения на территориях Кыргызстана и соседних государств, но имеются компьютерные модели, генерирующие данные в произвольной географической точке. Как и любые результаты моделирования, сведения, предоставляемые «Meteonorm», требуют верификации (сравнения) с наземными актинометрическими измерениями.

Оценка применимости данных «Meteonorm» для территории Кыргызстана

Изначально оценка солнечных ресурсов Кыргызстана проводилась по БД «NASA SSE» [3]. В работах [5 — 7] показано, что погрешность данных «NASA SSE» для среднемноголетних месячных значений суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для равнинной части территории России не превышает 10...15%.

Особенностью территории Кыргызстана является наличие гор, существенно усложняющих моделирование солнечной радиации на приемную поверхность. Этот факт является дополнительным основанием для верификации данных БД «Meteonorm» по актинометрическим станциям на территории Кыргызстана и соседних государств (табл. 2, рис. 1), информация по которым в работе получены из БД «НПС» или «WRDC».

В качестве основного критерия верификации данных взят:

$$\delta_{\text{Met-NПС(WRDC)}} \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{Met-NПС(WRDC)}}$ — относительное отклонение между сравниваемыми значениями солнечной радиации по двум БД,

$$\delta_{\text{Met-NПС(WRDC)}} = \frac{(R^{\text{Met}} - R^{\text{НПС(WRDC)}})}{R^{\text{НПС(WRDC)}}} 100\%,$$

Таблица 2

Сведения по наличию информации актинометрических станций Кыргызстана и соседних государств в базах данных

Наименование АС	Географические координаты			Наличие информации в БД		
	Страна	φ°, с.ш.	ψ°, в.д.	«НПС»	«WRDC»	«Meteonorm»
«Фрунзе»	Кыргызстан	42,8	74,5	+	—	+
«Чолпон-Ата»		42,7	77,1	+	—	+
«Тянь-Шань»		41,4	76	+	—	+
«Суусамыр»		41,7	78,2	+	—	+
«Ташкент»	Узбекистан	41,2	69,2	+	+	+
«Аральское море»	Казахстан	46,7	61,6	+	+	+
«Урумчи»	Китай	43,8	83,6	—	+	+

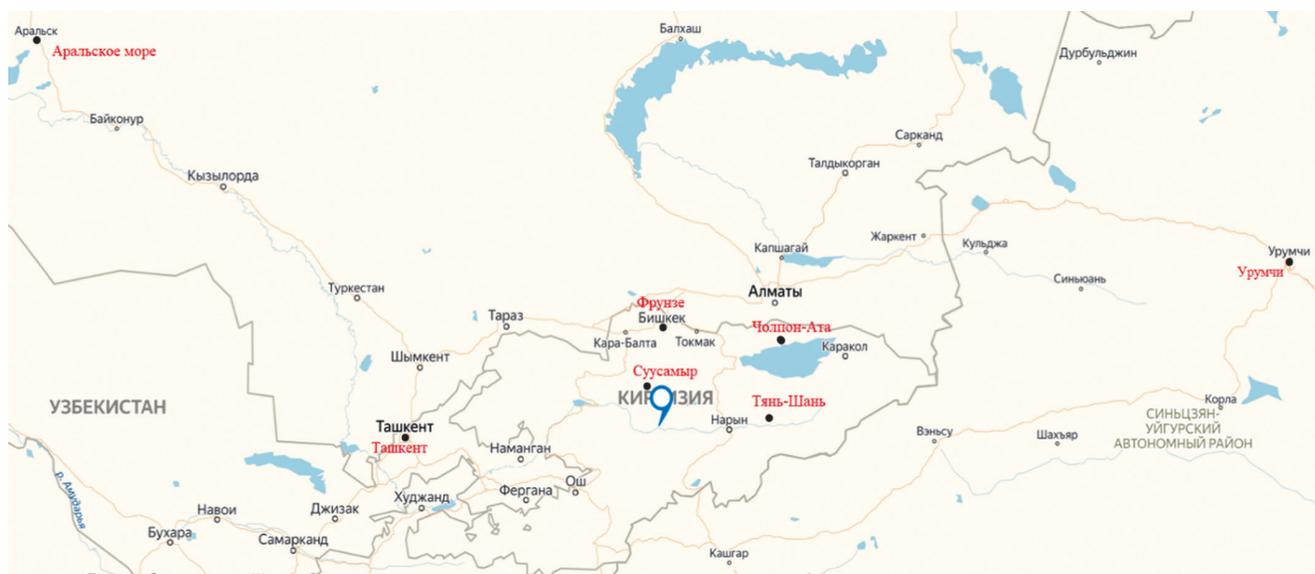


Рис. 1. Местоположение актинометрических станций на территории Кыргызстана и соседних государств

где R^{Met} , $R^{НПС(WRDC)}$ — среднемноголетние месячные и годовые значения суммарной СР по двум БД за общий период наблюдений; $\delta_{доп}$ — допустимая погрешность, принятая в работе, $\delta_{доп} = 10\%$ [8].

Сравниваемые данные должны быть осреднены за одинаковые периоды времени. Показания «Meteonorm» осреднены за период наблюдений с 1980 по 1991 гг., поэтому сопоставлены с осредненными за этот же период сведениями «WRDC» следующих актинометрических станций: «Ташкент», «Аральское море», «Урумчи» (табл. 3).

Как следует из табл. 3 и рис. 2, завышение (отклонения) данных «Meteonorm» составляет от 15 до 30% (в среднем 24,2%) относительно данных «WRDC» в течение всего года, т. е. критерий (1) не выполняется для всех сравниваемых значений. Также не выявлено внутригодовое изменение отклонения между сравниваемой информацией. На основании этого можно сделать вывод о неприменимости компьютерных моделей БД «Meteonorm» для анализируемых АС.

Сравнение данных БД «Meteonorm» с данными «НПС», осредненными за разные периоды наблюдений, проходило следующим образом.

Выполнено сопоставление осредненных данных БД «НПС» с данными «WRDC», осредненными за два периода наблюдений: общий период наблюдений с данными «НПС» (1964 — 1980) и период, не совпадающий с периодом осреднения данных БД «НПС», но общий с периодом осреднения данных «Meteonorm» (1980 — 1991) (табл. 4). Поскольку в «WRDC» отсутствует информация по актинометрическим станциям Кыргызстана, то сравнивалась информация двух актинометрических станций на территории соседних государств: Республики Узбекистан — «Ташкент», Республики Казахстан — «Аральское море» (см. табл. 4).

Как видно из таблицы 4, относительные отклонения между оцениваемыми данными по двум БД, осредненными за общий период наблюдений (с 1964 по 1980 гг.), составляют от 0 до 9,7%, т. е. не превышают $\pm 10\%$ в соответствии с критерием (1). Следует отметить, что

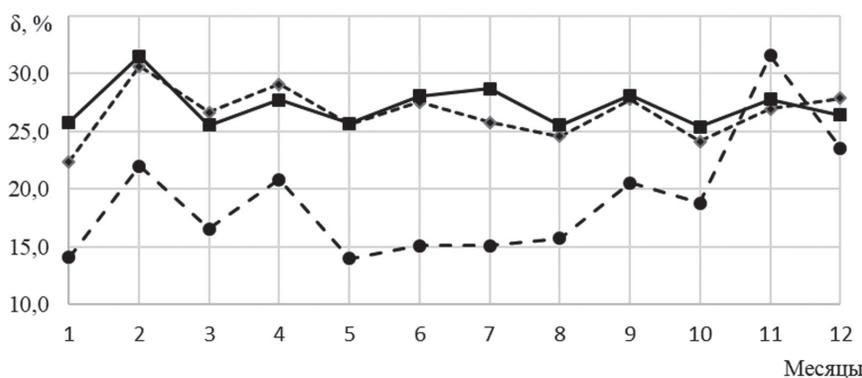


Рис. 2. Отклонения между данными трех АС на территории соседних с Кыргызстаном государств по БД «WRDC» и «Meteonorm»:

◆ — «Ташкент»; ● — «Аральское море»; ■ — «Урумчи»

Таблица 3

Сравнение месячных суммарных значений СР трех АС на территории соседних с Кыргызстаном государств по данным БД «WRDC» и «Meteonorm»

Месяц	АС «Ташкент»			АС «Аральское море»			АС «Урумчи»		
	«WRDC»	«Meteonorm»	δ, %	«WRDC»	«Meteonorm»	δ, %	«WRDC»	«Meteonorm»	δ, %
1	59	76	22,4	58	64	14,1	46	62	25,8
2	77	111	30,6	87	109	22,0	63	92	31,5
3	110	150	26,7	127	157	16,6	108	145	25,5
4	151	213	29,1	170	216	20,8	151	209	27,8
5	209	281	25,6	227	265	14,0	188	253	25,7
6	234	323	27,6	234	278	15,1	195	271	28,0
7	239	322	25,8	232	272	15,1	179	251	28,7
8	218	289	24,6	208	242	15,7	175	235	25,5
9	164	227	27,8	158	195	20,5	138	192	28,1
10	110	145	24,1	101	117	18,8	97	130	25,4
11	65	89	27,0	57	76	31,6	52	72	27,8
12	44	61	27,9	40	51	23,5	39	53	26,4
Год	1680	2287	26,5	1698	2042	19,0	1431	1965	27,2

Таблица 4

Сравнение среднееголетних месячных значений суммарной СР (кВт·ч/м²) по данным двух БД за общие и несовпадающие периоды наблюдений

Месяц	Сравнение данных БД «WRDC» и «НПС»					
	АС «Ташкент»			АС «Аральское море»		
	«WRDC»	«НПС»	δ, %	«WRDC»	«НПС»	δ, %
общий период наблюдений (1964 — 1980)						
1	59	64	-7,2	58	55	4,6
2	77	79	-2,8	87	85	2,2
3	110	117	-5,9	127	131	-3,4
4	151	159	-4,7	170	171	-0,4
5	209	215	-2,7	227	228	-0,4
6	234	240	-2,6	234	236	-0,8
7	239	241	-0,7	232	231	0,5
8	218	221	-1,1	208	204	1,9
9	164	169	-2,8	158	155	1,7
10	110	120	-8,0	101	95	6,3
11	65	72	-9,7	57	52	9,6
12	44	49	-9,7	40	39	3,1
Год	1680	1743	-4,8	1698	1683	2,1
несовпадающие периоды наблюдений						
Месяц	«WRDC» 1980 — 1991	«НПС»	δ, %	«WRDC» 1980 — 1991	НПС	δ, %
1	61	59	4,2	56	58	-1,8
2	76	77	4,8	85	87	0,1
3	108	110	7,9	128	127	2,3
4	158	151	0,3	163	170	4,9
5	203	209	5,6	230	227	-0,9
6	229	234	4,9	231	234	2,2
7	227	239	6,0	227	232	1,8
8	203	218	8,6	202	208	1,0
9	155	164	8,9	154	158	0,6
10	111	110	7,8	97	101	-2,1
11	70	65	2,9	56	57	-7,1
12	47	44	3,7	41	40	-4,9
Год	1648	1680	5,5	1670	1698	-0,3

относительные отклонения между данными «НПС» и «WRDC», осредненными за разные периоды наблюдений, составляют от 0,1 до 8,9%, т. е. тоже не превышают $\pm 10\%$ в соответствии с критерием (1). Изменение годового прихода суммарной СР за период с 1964 по 1991 гг. анализировалось по данным АС («Ташкент» и «Аральское море») из БД «WRDC» (рис. 3, табл. 5). Тенденция вариации годового прихода суммарной СР в многолетнем разрезе не была выявлена, ее изменение несущественно. Так, коэффициенты вариации годовой суммарной СР на АС «Ташкент» — 0,033, на АС «Аральское море» — 0,026 (см. табл. 5).

Проведенные исследования позволили принять взятое допущение, в соответствии с которым проведено сравнение данных четырех актинометрических станций Кыргызстана из БД «НПС» и БД «Meteonorm», осреднённых за несовпадающие периоды наблюдений (табл. 6, рис. 4).

Как следует из табл. 6 и рис. 4, относительные отклонения между изучаемыми данными четырех АС Кыргызстана составляют от 2,5 до 38,5%, т. е. в большинстве случаев критерий (1) не выполняется. Замечено, что внутригодовое изменение относительного отклонения зависит от широты местности. Для при-

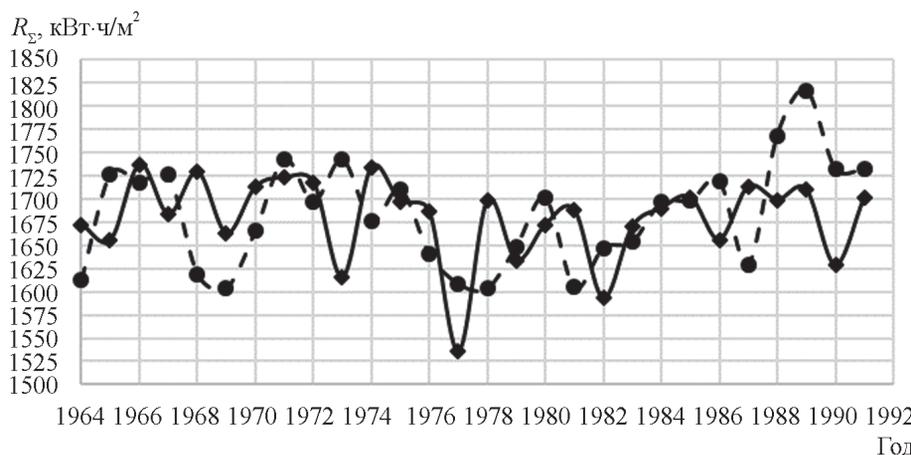


Рис. 3. Многолетние вариации годовой суммарной СР на АС «Ташкент» (●) и «Аральское море» (◆)

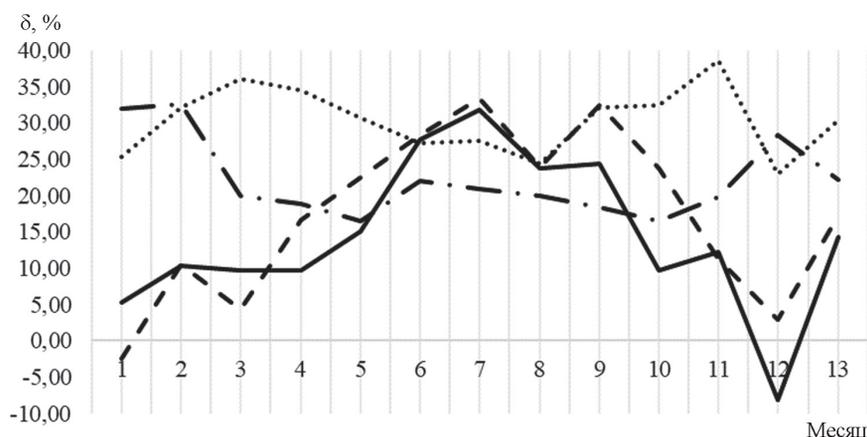


Рис. 4. Относительные отклонения месячных значений СР по данным БД «Meteonorm» и «НПС» в точках четырех АС:
—•— «Чолпон-Ата»; ••• — «Фрунзе»; — — — «Суусамыр» — — — «Тянь-Шань»

Таблица 5

Диапазоны изменения годовой суммарной СР за период 1964 — 1991 гг. по данным БД «WRDC»

Наименование АС	Диапазон изменения суммарной СР за период 1964 — 1991, кВт·ч/м ²		C _v	Среднеголетнее значение суммарной СР за период 1964 — 1991, кВт·ч/м ²
	min	max		
«Ташкент»	1604	1743	0,033	1678
«Аральское море»	1535	1737	0,026	1683

Таблица 6

Сравнение среднегодовой месячной суммарной СР (кВт·ч/м²) на четырех АС Кыргызстана из БД «НПС» и «Meteonorm», осреднённых за несовпадающие периоды наблюдений

Месяц	АС «Чолпон-Ата»			АС «Фрунзе»			АС «Суусамыр»			АС «Тянь-Шань»		
	«Meteonorm»	«НПС»	δ, %	«Meteonorm»	«НПС»	δ, %	«Meteonorm»	«НПС»	δ, %	«Meteonorm»	«НПС»	δ, %
1	91	62	31,9	83	62	25,3	80	82	-2,5	96	91	5,2
2	126	85	32,5	112	76	32,1	115	103	10,4	126	113	10,3
3	176	141	19,9	164	105	36,0	163	156	4,3	195	176	9,7
4	213	173	18,8	218	143	34,4	199	166	16,6	227	205	9,7
5	248	207	16,5	247	185	30,7	240	186	22,5	253	215	15,0
6	268	209	22,0	263	206	27,2	282	202	28,4	282	204	27,7
7	268	212	20,9	271	218	27,6	312	208	33,3	287	196	31,7
8	240	192	20,0	245	193	24,3	260	198	23,8	245	187	23,7
9	196	160	18,4	208	148	32,1	231	156	32,5	209	158	24,4
10	133	111	16,5	135	98	32,4	152	116	23,7	145	131	9,7
11	86	69	19,8	96	59	38,5	89	79	11,2	106	93	12,3
12	74	53	28,4	61	47	23,0	71	69	2,8	74	80	-8,1
Год	2119	1674	22,1	2103	1541	30,3	2181	1719	17,3	2245	1850	14,3

менения данных из БД «Meteonorm» на территории Кыргызстана необходима разработка математической модели или поправочных коэффициентов.

Создание математической модели восстановления среднегодовых месячных приходов суммарной солнечной радиации по данным БД «Meteonorm» на территории Кыргызстана

Рассмотрим методику восстановления месячных данных суммарного прихода СР на территории Кыргызстана $R_{\Sigma}^{\text{мод}}$ по данным БД «Meteonorm» R_{Σ}^{Met} , т. е. проанализируем возможность построения линейной модели взаимосвязи:

$$R_{\Sigma}^{\text{мод}} = aR_{\Sigma}^{\text{Met}} + b,$$

где a, b — коэффициенты модели.

В качестве критерия достоверности модели использован коэффициент детерминированности R^2 , характеризующий наличие (или отсутствие) корреляционной связи между генерируемыми данными «Meteonorm» R_{Σ}^{Met} и осредненными из «НПС» (или «WRDC») $R_{\Sigma}^{\text{НПС(WRDC)}}$. На рисунке 5 изображены эмпирическая зависимость между данными пяти АС («Фрунзе», «Чолпон-Ата», «Суусамыр», «Тянь-Шань», Ташкент») из «НПС» (или «WRDC») и «Meteonorm» и её аналитическая зависимость в виде

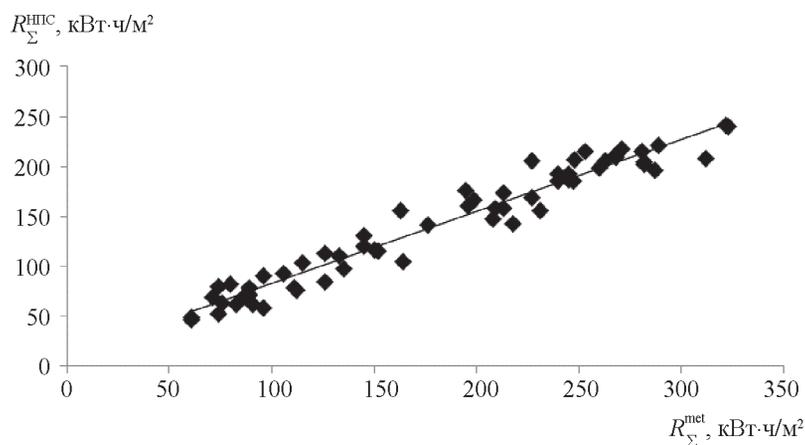


Рис. 5. Корреляционные зависимости между среднегодовыми месячными значениями суммарной СР по данным БД «НПС» и «Meteonorm»

$$R_{\Sigma}^{\text{мод}} = 0,7212R_{\Sigma}^{\text{Met}} + 10,531 \quad (2)$$

с коэффициентом детерминированности $R^2 = 0,9499$.

Оценка применимости разработанной модели (2) выполнена в соответствии с критерием (1). Выявлено, что среднее относительное отклонение между значениями, рассчитанными по (2), и данным БД «НПС», составляет 8,9%.

Для снижения погрешности модели (2) по данным пяти АС («Фрунзе», «Чолпон-Ата», «Суусамыр», «Тянь-Шань», Ташкент») получены аналитические зависимости коэффициентов a и b модели (2) от широты местности:

$$a(\varphi) = 0,1157\varphi - 4,129; \quad (3)$$

$$b(\varphi) = -23,86\varphi - 1010,4. \quad (4)$$

Дополнение модели (2) определением коэффициентов a и b по (3), (4) позволили снизить среднее значение относительного отклонения между модельными значениями, рассчитанными по данным «Meteonorm», и «НПС» до 7,5%.

Теоретический потенциал солнечной энергии

Сравнение среднемноголетней суммарной СР по данным пяти актинометрических станций из двух БД «Meteonorm» и «НПС» выявило, что завышение суммарной СР по данным «Meteonorm» составляет от 21,4 до 36,5% (табл. 7), т. е. для определения суммарного годового прихода СР на территории Кыргызстана требуется их коррекция.

Определены поправочные коэффициенты K_{ol} по данным пяти актинометрических станций:

$$K_{ol} = R_{\Sigma l}^{\text{НПС}}/R_{\Sigma l}^{\text{Met}}, \quad (5)$$

где l — номер актинометрической станции; $R_{\Sigma l}^{\text{НПС}}$, $R_{\Sigma l}^{\text{Met}}$ — среднемноголетние приходы суммарной солнечной радиации в точке l -й актинометрической станции по данным «НПС» и «Meteonorm» (или при их отсутствии по данным «WRDC»).

Анализ полученных результатов выявил аналитическую зависимость среднемноголетнего коэффициента K_o от широты местности φ :

$$K_o(\varphi) = -0,0177\varphi + 1,5209. \quad (6)$$

Таблица 7

Сравнение среднемноголетних значений суммарного прихода СР по данным БД «НПС» и «Meteonorm»

Параметры	АС «Чолпон-Ата»	АС «Фрунзе»	АС «Суусамыр»	АС «Тянь-Шань»	АС «Ташкент»
$R_{\Sigma l}^{\text{Met}}$, кВт·ч/м ²	2119	2103	2181	2245	2287
$R_{\Sigma l}^{\text{НПС}}$, кВт·ч/м ²	1674	1541	1719	1850	1743
$\delta_{\text{Met-НПС}}$, %	26,6	36,5	26,9	21,4	31,2
K_{ol}	0,79	0,73	0,78	0,82	0,76
$K_o(\varphi)$	0,77	0,77	0,78	0,79	0,79
$R_{\Sigma l}^{\text{мод}}$, кВт·ч/м ²	1631,63	1619,31	1701,18	1773,55	1806,73
$\delta_{\text{мод-НПС}}$, %	2,5	5,1	1,03	4,1	-3,6

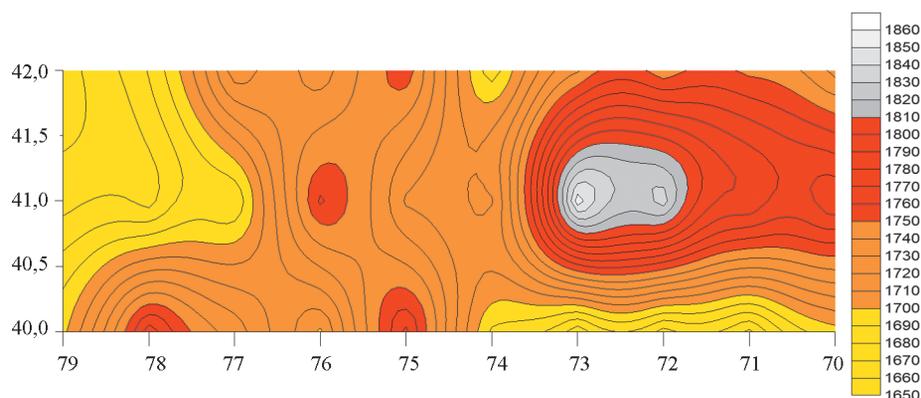


Рис. 6. Карта распределения суммарной солнечной радиации по территории Кыргызстана

Верификацию полученной модели проводили в соответствии с критерием (1) сравнением данных в точках пяти актинометрических станций из СБД «НПС» $R_{\Sigma l}^{\text{НПС}}$ с модельными данными, рассчитанными по формуле:

$$R_{\Sigma l}^{\text{мод}} = K_o(\varphi)R_{\Sigma l}^{\text{Met}}, \quad (7)$$

где $R_{\Sigma l}^{\text{мод}}$ — модельное значение среднесуточного годового прихода СР в l -й точке; $K_o(\varphi)$ — среднесуточный поправочный коэффициент, полученный по (6).

Как следует из табл. 7, отклонения между сравниваемыми значениями не превышают 10%, что подтверждает применимость модели (5) для территории Кыргызстана.

Расчет теоретического потенциала солнечной энергии территории страны сделан следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = T \sum_{i=1}^n R_{\Sigma i}^{\text{мод}} F_i,$$

где n — количество зон, на которые поделена территория Кыргызстана по сетке с шагом 10×10 ; $R_{\Sigma i}^{\text{мод}}$ — среднесуточный суммарный годовой приход СР в i -й зоне, рассчитанный по (6), (7), кВт·ч/м²; F_i — часть площади страны в i -й зоне (суммарная площадь всех зон — площадь территории Кыргызстана — 199800 км²).

Литература

1. **Мировой центр** радиационных данных [Официальный сайт]. www.wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (дата обращения 05.10.2019).
2. **Meteonorm Software** [Официальный сайт]. www.meteonorm.ru (дата обращения 07.10.2019).
3. **The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set** [Официальный сайт]. www.eosweb.larc.nasa.gov/sse (дата обращения 07.10.2019).
4. **Научно-прикладной справочник** по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1 — 6. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 1. Кн. 1.
5. **Попель О.С. и др.** Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: Изд-во МФТИ, 2010.
6. **Попель О.С. и др.** Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных). М.: Изд-во МФТИ, 2010.
7. **Гридасов М.В. и др.** Разработка геоинформационной системы. Возобновляемые источники энергии России // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 38—45.
8. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика. М.: Издат. дом МЭИ, 2008.
9. **Киселева С.В., Коломиец Ю.Г., Попель О.С.** Оценка ресурсов солнечной энергии в Центральной Азии // Гелиотехника. 2015. № 3. С. 69—74.
10. **Surfer 8 Software** [Официальный сайт] www.surfer.software.informer.com (дата обращения 15.10.2019).

Уточненный теоретический потенциал солнечной энергии Кыргызстана составляет 350847 млрд кВт·ч/м² или 43,05 млрд т у.т., что в 1,3 раза больше, чем определенный в [9] — 35 млрд т у.т.

По вычисленным данным $R_{\Sigma i}^{\text{мод}}$ в программе «Surfer 8» [10] построена карта распределения среднесуточного суммарного прихода СР по территории Кыргызстана (рис. 6).

Из рисунка 6 видно, что на всей территории Кыргызстана имеются благоприятные условия для использования СЭ. Среднесуточный приход суммарной СР меняется незначительно — от 1656 до 1856 кВт·ч/м², среднее значение — 1756 кВт·ч/м².

Выводы

Доказана неприменимость для условий Кыргызстана компьютерных моделей БД «Meteonorm» для генерирования месячной и годовой суммарной СР.

Разработаны математические модели восстановления месячных и многолетних значений суммарной СР по данным «Meteonorm».

Уточнен теоретический потенциал солнечной энергии Кыргызстана, равный 350847 млрд кВт·ч/м² или 43,05 млрд т у.т.

References

1. **Mirovoy Tsentr** Radiatsionnykh Danykh [Ofits. Sayt]. www.wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (Data Obrashcheniya 05.10.2019). (in Russian).
2. **Meteonorm Software** [Ofits. Sayt]. www.meteonorm.ru (Data Obrashcheniya 07.10.2019). (in Russian).
3. **The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set** [Ofits. sayt]. www.eosweb.larc.nasa.gov/sse (data obrashcheniya 07.10.2019).
4. **Nauchno-prikladnoy Spravochnik** po Klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie Danye. Ch. 1 — 6. L.: Gidrometeoizdat, 1989;1;1. (in Russian).
5. **Popel' O.S. i dr.** Atlas Resursov Solnechnoy Energii na Territorii Rossii. M.: Izd-vo MFTI, 2010. (in Russian).
6. **Popel' O.S. i dr.** Klimaticheskie Danye dlya Vozobnovlyаемoy Energetiki Rossii (Baza Klimaticheskikh Danykh). M.: Izd-vo MFTI, 2010. (in Russian).
7. **Gridasov M.V. i dr.** Razrabotka Geoinformatsionnoy Sistemy. Vozobnovlyаемye Istochniki Energii Rossii. Teploenergetika. 2011;11:38—45. (in Russian).
8. **Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K.** Solnechnaya Energetika. M.: Izdat. dom MEI, 2008. (in Russian).
9. **Kiseleva S.V., Kolomiets Yu.G., Popel' O.S.** Otsenka Resursov Solnechnoy Energii v Tsentral'noy Azii. Geliotekhnika. 2015;3:69—74. (in Russian).
10. **Surfer 8 Software** [Ofits. Sayt] www.surfer.software.informer.com (Data Obrashcheniya 15.10.2019).

Сведения об авторах:

Максатов Баатай Максатович — аспирант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: baatai.maksat@gmail.com

Пугачев Роман Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: windroman@mail.ru

Дерюгина Галина Владимировна — старший преподаватель кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: derugina63@mail.ru

Information about authors:

Maksatov Baatay M. — Ph.D.-student of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: baatai.maksat@gmail.com

Pugachev Roman V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: windroman@mail.ru

Deryugina Galina V. — Senior Lecturer of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: derugina63@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 03.12.2019

The article received to the editor: 03.12.2019