

УДК 621.548

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

В.В. Атоян¹, А.А. Оганнисян¹, С.Г. Геворгян²

¹*Национальный политехнический университет Армении*

²*ЗАО "Научно-исследовательский институт энергетики"*

Проведен сравнительный анализ шести моделей интенсивностей прямого, диффузного и суммарного солнечных излучений, поступающих на горизонтальную поверхность, с учетом продолжительности солнечного сияния. Проверка моделей интенсивностей солнечного излучения проводилась для местностей, где расположены и действуют актинометрические станции. В результате детального изучения всех моделей осуществлены выбор и доработка модели, показавшей наилучшую точность для условий Республики Армения. Анализ моделей показал, что наименьшее отклонение от статистических данных актинометрических станций РА демонстрирует модель Псилоглу для расчета интенсивности солнечного излучения.

Ключевые слова: интенсивность солнечного излучения, коэффициент оптического пропускания, продолжительность солнечного сияния, поправочные коэффициенты.

Введение. При проектировании солнечных электростанций в качестве основных характеристик используются характеристики солнечного излучения (СИ), поступающего на горизонтальную поверхность. Из них наиболее важными являются плотности потока прямого и диффузного СИ, поступающих на горизонтальную поверхность данной местности. Зачастую они задаются среднемесячными значениями.

Однако при проектировании станций, оптимизации режимов их работы необходимы почасовые значения за каждый день года. Измерение параметров СИ производится не по всей территории РА, поэтому проверка и обработка моделей прогнозирования интенсивностей СИ проводились для местностей, где расположены и действуют актинометрические станции.

В [1] проведен сравнительный анализ некоторых моделей интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ, поступающих на горизонтальную поверхность, для местности актинометрической станции Мартуни. Однако результаты анализа не могут быть использованы для всей территории РА, так как другие районы Армении имеют значительно различающиеся актинометрические и синоптические условия. Исходя из этого, чтобы получить более

достоверные результаты, целесообразно проводить исследования для различных территорий Армении.

Целью статьи является обоснование применения модели прогнозирования интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ для различных районов РА.

Представление моделей прогнозирования СИ. Были рассмотрены следующие модели: Дейвиса-Хейа [2], Джозефсона [3], “Ц” Икбала [4], Янга [5], Псилоглу [6], Бьерда [7]. Детальное представление моделей приведено в [1]. Все эти модели предназначены для расчета интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ при чистом небе. Однако для определения их реальных значений необходимо учитывать реальную продолжительность солнечного сияния за день. Влияние продолжительности солнечного сияния на величину интенсивностей прямого и диффузного СИ в линейном виде описал Псилоглу [6].

В общем случае входными параметрами для моделей являются: географическая широта (φ), долгота (θ) и абсолютная высота (Н) местности, день Джулиана ($DN = \overline{1;365}$), час дня (t), температура (Т, К), атмосферное давление ($P, 10^2 \text{ Н/м}^2$) и относительная влажность (RH) воздуха, альbedo поверхности местности (ρ_g), коэффициент спектральной мутности Ангстрема ($\beta = 0,08$).

Сравнительный анализ моделей оценки интенсивностей СИ для любых погодных условий. Для определения точности рассматриваемых моделей для условий РА осуществлен расчет месячных сумм прямого, диффузного и суммарного СИ в течение 2005-2015 гг. Затем произведено сравнение результатов расчета с данными актинометрических станций Мартуни, Севан, Гюмри и Ереван Агро.

Исходные данные расчета были предоставлены “Государственной службой по гидрометеорологии и мониторингу Армении (АРМГОСГИДРОМЕТ)”.

Для каждого месяца года сумма СИ, поступающего на горизонтальную поверхность, определялась как

$$W_{mj}^{cal} = \sum_{DN=1}^{n_j} \sum_{t_{rise}}^{t_{set}} I(t) dt, \quad (1)$$

где n_j - количество дней j - го месяца; t_{rise} , t_{set} - время восхода и захода Солнца; $I(t)$ - интенсивность СИ, поступающего в течение i - го часа j - го месяца.

Среднеквадратичные отклонения (СКО) расчета для отдельных моделей представлены в табл. 1. СКО моделей вычислены по следующей формуле:

$$r_{\%} = \frac{1}{\overline{W_{mj}^{ms}}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_c} (W_{mj}^{ms} - W_{mj}^{cal})^2}{N_c}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $\overline{W_{mj}^{ms}}$ - усредненное значение наблюдаемых сумм энергии СИ, поступающего на горизонтальную поверхность в течение j - го месяца; N_c - количество сравниваемых пар месячных значений энергии СИ.

Таблица 1

Среднеквадратичные отклонения (СКО) расчета (%)

| | Модель | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Для прямого СИ | Дейвиса-Хейя | 69 | 49 | 44 | 71 | 44 | 29 | 27 | 26 | 23 | 36 | 43 | 51 |
| | Джозефсона | 45 | 33 | 35 | 64 | 40 | 27 | 23 | 21 | 17 | 26 | 27 | 33 |
| | “Ц” Икбала | 23 | 17 | 23 | 36 | 32 | 35 | 35 | 36 | 37 | 35 | 34 | 32 |
| | Бьерда | 63 | 47 | 45 | 76 | 49 | 34 | 33 | 31 | 26 | 37 | 40 | 47 |
| | Янга | 43 | 34 | 37 | 67 | 43 | 29 | 26 | 24 | 18 | 27 | 27 | 32 |
| | Псилоглу | 22 | 19 | 20 | 40 | 26 | 20 | 16 | 15 | 19 | 24 | 29 | 34 |
| Для диффузного СИ | Дейвиса-Хейя | 29 | 31 | 28 | 26 | 20 | 23 | 23 | 24 | 19 | 19 | 23 | 37 |
| | Джозефсона | 25 | 29 | 27 | 25 | 20 | 24 | 24 | 24 | 18 | 17 | 20 | 34 |
| | “Ц” Икбала | 23 | 32 | 36 | 43 | 45 | 52 | 56 | 56 | 51 | 48 | 44 | 38 |
| | Бьерда | 53 | 44 | 33 | 26 | 19 | 21 | 19 | 20 | 12 | 17 | 29 | 65 |
| | Янга | 33 | 34 | 29 | 25 | 19 | 22 | 22 | 22 | 15 | 14 | 19 | 40 |
| | Псилоглу | 16 | 24 | 25 | 28 | 24 | 27 | 28 | 28 | 21 | 23 | 25 | 29 |
| Для суммарного СИ | Дейвиса-Хейя | 41 | 32 | 28 | 34 | 24 | 16 | 14 | 13 | 12 | 18 | 20 | 30 |
| | Джозефсона | 29 | 25 | 23 | 30 | 21 | 14 | 12 | 11 | 10 | 13 | 13 | 19 |
| | “Ц” Икбала | 15 | 18 | 22 | 27 | 32 | 36 | 40 | 40 | 40 | 37 | 33 | 24 |
| | Бьерда | 55 | 41 | 33 | 39 | 29 | 21 | 20 | 18 | 18 | 26 | 30 | 48 |
| | Янга | 34 | 29 | 26 | 33 | 24 | 16 | 14 | 13 | 11 | 15 | 15 | 23 |
| | Псилоглу | 13 | 14 | 15 | 19 | 16 | 14 | 14 | 15 | 17 | 19 | 21 | 16 |

Полученные результаты расчета позволили сделать следующие выводы:

1. Модели Дейвиса-Хейя, Джозефсона, Бьерда и Янга демонстрируют большое расхождение от наблюдаемых данных для зимних и весенних месяцев. Однако для остальных месяцев года наблюдается противоположное явление. Следует отметить, что самыми простыми для использования являются модели Дейвиса-Хейя и Джозефсона, так как в них не рассматривается коэффициент оптического пропускания, учитывающий поглощение СИ газовой смесью.
2. По сравнению с моделями Дейвиса-Хейя, Джозефсона, Бьерда и Янга, модель “Ц” Икбала демонстрирует противоположное поведение для условий РА - СКО расчета по этой модели низко для зимних и весенних и велико для летних и осенних месяцев года.
3. Модель Псилоглу обеспечивает минимальное расхождение расчетных значений сумм прямого, диффузного и суммарного СИ от наблюдаемых данных.

Для повышения точности расчета в модели Псилоглу были введены месячные поправочные коэффициенты (k_j) прямого и диффузного СИ для разных местностей и общей территории РА. Эти коэффициенты находились методом наименьших квадратов:

$$\sum_1^{N_c} (W_{mj}^{ms} - k_j \cdot W_{mj}^{cal})^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Поправочные коэффициенты k_j представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты для прямого и диффузного СИ

| Местность | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Для прямого СИ | Ереван | 1,19 | 1,13 | 1,25 | 1,11 | 1,26 | 1,20 | 1,20 | 1,22 | 1,28 | 1,32 | 1,29 | 1,26 |
| | Гюмри | 1,01 | 1,12 | 1,09 | 0,87 | 1,01 | 1,10 | 1,07 | 1,11 | 1,23 | 1,15 | 1,28 | 1,26 |
| | Мартуни | 0,99 | 1,07 | 0,93 | 0,68 | 0,79 | 0,96 | 0,98 | 1,02 | 1,08 | 1,07 | 1,04 | 1,26 |
| | Севан | 1,00 | 0,98 | 0,83 | 0,64 | 0,76 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 1,02 | 1,03 | 1,21 | 1,16 |
| Для диффузного СИ | Ереван | 1,14 | 1,29 | 1,28 | 1,34 | 1,29 | 1,31 | 1,35 | 1,35 | 1,28 | 1,27 | 1,30 | 1,08 |
| | Гюмри | 0,86 | 0,79 | 0,83 | 0,95 | 0,97 | 1,08 | 1,15 | 1,16 | 1,13 | 1,09 | 1,15 | 0,97 |
| | Мартуни | 1,05 | 1,05 | 1,10 | 1,20 | 1,20 | 1,18 | 1,14 | 1,21 | 1,15 | 1,27 | 1,19 | 0,95 |
| | Севан | 0,99 | 1,01 | 1,07 | 1,22 | 1,33 | 1,35 | 1,49 | 1,45 | 1,32 | 1,33 | 1,20 | 1,06 |

Таблица 3

Поправочные коэффициенты для общей территории РА

| СИ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Прямое | 1,02 | 1,07 | 1,01 | 0,84 | 0,96 | 1,05 | 1,05 | 1,08 | 1,16 | 1,14 | 1,20 | 1,23 |
| Диффузное | 1,00 | 1,01 | 1,05 | 1,17 | 1,19 | 1,23 | 1,28 | 1,29 | 1,22 | 1,24 | 1,21 | 1,01 |

Доработанная модель Псилоглу принимает следующий вид:

$$I'_{d,k} = k_d \cdot I'_d, \quad (4)$$

$$I'_{dif,k} = k_{dif} \cdot I'_{dif}, \quad (5)$$

$$I'_{T,k} = I'_{d,k} + I'_{dif,k}. \quad (6)$$

где I'_d , I'_{dif} - интенсивности прямого и диффузного СИ, рассчитанные по модели Псилоглу; k_d , k_{dif} - поправочные коэффициенты.

Введение поправочных коэффициентов значительно снижает СКО сумм расчетных значений месячных сумм СИ от наблюдаемых месячных сумм. В качестве примера в табл. 3 представлены месячные СКО расчета по модели Псилоглу, а в табл. 4 - то же, по доработанной модели Псилоглу для актинометрической станции Ереван Агро.

Таблица 3

СКО расчета по модели Псилоглу

| СИ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Прямое | 18 | 16 | 23 | 23 | 22 | 23 | 17 | 19 | 22 | 26 | 25 | 27 |
| Диффузное | 16 | 26 | 25 | 32 | 24 | 30 | 27 | 28 | 23 | 24 | 25 | 20 |
| Суммарное | 16 | 19 | 22 | 19 | 22 | 20 | 19 | 21 | 22 | 24 | 23 | 16 |

Таблица 4

СКО расчета по доработанной модели Псилоглу

| СИ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------|----|----|----|----|---|----|---|----|---|----|----|----|
| Прямое | 7 | 10 | 12 | 21 | 8 | 16 | 3 | 5 | 3 | 10 | 11 | 18 |
| Диффузное | 10 | 13 | 13 | 19 | 7 | 18 | 8 | 11 | 6 | 10 | 9 | 18 |
| Суммарное | 7 | 8 | 6 | 8 | 5 | 7 | 2 | 4 | 3 | 7 | 6 | 5 |

На рис. 1 и 2 показано поступление прямого, диффузного и полного СИ на горизонтальную поверхность в течение различных дней усредненного года для актинометрической станции Ереван Агро.

На практике часовые значения интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ отличаются от рассчитанных значений СИ по доработанной модели Псилоглу, так как уровень облачности неба в течение дня постоянно меняется. Однако, так как при проектировании солнечной фотоэлектрической станции необходимо определить суточное производство электроэнергии, доработанная модель Псилоглу может быть использована для решения этой проблемы.

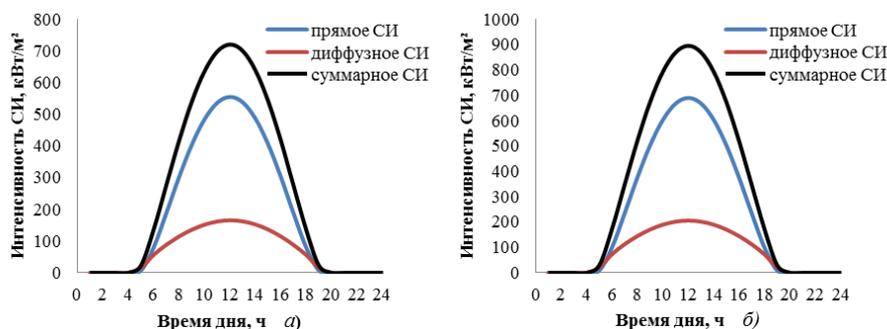


Рис. 1. Изменение интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ для станции Ереван Агро в течение 15 января: а - значения, рассчитанные по модели Псилоглу; б - значения, рассчитанные по модели Псилоглу с применением поправочных коэффициентов

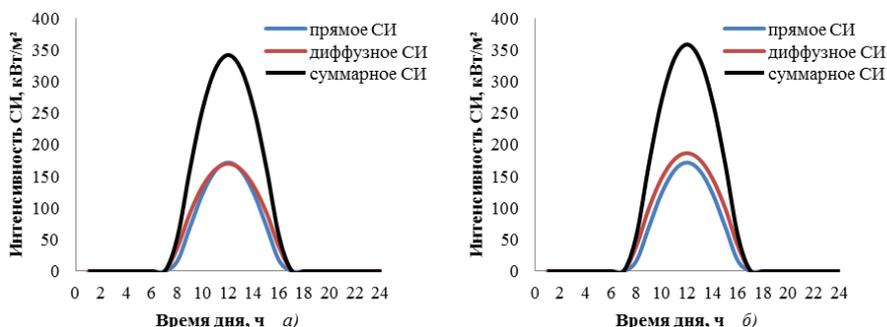


Рис. 2. Изменение интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ для станции Ереван Агро в течение 15 июня: а - значения, рассчитанные по модели Псилоглу; б - значения, рассчитанные по модели Псилоглу с применением поправочных коэффициентов

Выводы

1. В исследованных моделях рассчитанные значения отдельных коэффициентов оптического пропускания СИ значительно отличаются друг от друга. Однако информация для определения точности расчета этих коэффициентов недоступна.

2. Модели Дейвиса-Хейя, Бьерда и Янга не могут быть использованы для оценки интенсивностей прямого, диффузного и суммарного СИ, так как расчет по ним дает завышенные значения сумм СИ, что недопустимо при оценке производства электрической энергии проектируемой солнечной станции. Следовательно, эти модели нецелесообразно использовать в дальнейших расчетах при проектировании солнечной станции.

3. Модель "Ц" Икбала, наоборот, дает существенно заниженные значения месячных сумм СИ. Поэтому ее тоже нецелесообразно использовать в качестве расчетной при проектировании солнечной электростанции на территории РА.

4. Модели Джозефсона и Псилоглу дают наибольшую точность расчетов. Модель Джозефсона более проста, чем модель Псилоглу. Между тем СКО расчета по модели Джозефсона велики отдельно для месячных сумм прямого и диффузного СИ. Однако модель Псилоглу обеспечивает минимальные СКО отдельно для месячных сумм прямого, диффузного и суммарного СИ. Следовательно, данная модель может быть использована при проектировании солнечной электростанции на территории РА.

5. Доработанная модель Псилоглу минимизирует СКО расчетных значений месячных сумм СИ от наблюдаемых месячных сумм для всей территории РА.

Լիտերատուրա

1. **Ատոյան Վ.Վ., Օգաննիսյան Ա.Ա.** Исследование и анализ моделей прогнозирования почасовых значений прямой, диффузной и суммарной интенсивностей солнечного излучения для реальных метеорологических условий Армении // Вестник Инженерной академии Армении.- 2015.- Том 12, №3.- С. 473-479.
2. **Devies J.A., Hay J.E.** Calculation of the Solar Radiation Incident on a Horizontal Surface // Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop, April 17-19, 1978.- Canadian Atmospheric Environment Service.- 1979.
3. **Davies J.A., McKay D.C., Luciani G. and Abdel - Wahab M.** Validation of models for estimating solar radiation on horizontal surfaces // IEA Task IX Final Report, Vol. 1.- Atmospheric Environment Service.- Downsview, 1988.- 99 p.
4. **Iqbal M.** An Introduction to Solar Radiation // Academic mate data.- Atmos.- Envir.- Toronto, 1983.- 390 p.
5. **Yang K., Koike T.** A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies // Water Resour. Res.- 2005.- 41, W10403.- P.13.
6. **Psiloglou B.E.** Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the Earth's surface // Application to Mediterranean climate. Pure Appl.- Geophys.- 2000.- 157.- P. 829-860.
7. **Bird R.E., Hulstrom R.L.** A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces // SERI/ TR. - Solar Energy Research Institute (SERI /NREL).- 1981.- P. 642-761.

*Поступила в редакцию 18.02.2016.
Принята к опубликованию 26.05.2016.*

ԱՐԵՂԱԿԱՆԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Վ.Վ. Աթոյան, Հ.Հ. Հովհաննիսյան, Ս.Գ. Գևորգյան

Իրականացվել է հորիզոնական մակերևույթին ընկնող ուղիղ, ցրված և գումարային արեգակնային ճառագայթման ինտենսիվությունների վեց մոդելների համեմատական վերլուծություն՝ հաշվի առնելով արևափայլի տևողությունը: Արեգակնային ճառագայթման ինտենսիվությունների մոդելների ստուգումը կատարվել է այն տեղանքներում, որտեղ տեղակայված են և գործում են ակտիվմետրական կայաններ: Բոլոր մոդելների մանրամասն ուսումնասիրության արդյունքում կատարվել է լավագույն ճշգրտությունը ցուցաբերած մոդելի ընտրություն և ճշգրտում ՀՀ պայմանների համար: Մոդելների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ ՀՀ ակտիվմետրական կայանների վիճակագրական տվյալներից ամենափոքր շեղումը դրսևորվում է արեգակնային ճառագայթման ինտենսիվության հաշվարկման Պսիլոլուի մոդելի դեպքում:

Առանցքային բաներ. արեգակնային ճառագայթման ինտենսիվություն, օպտիկական թափանցելիության գործակից, արևափայլի տևողություն, ճշգրտող գործակիցներ:

ANALYSIS OF SOLAR RADIATION INTENSITY MODELS FOR THE CONDITIONS OF REPUBLIC OF ARMENIA

V.V. Atoyán, H.H. Hovhannisyan, S.G. Gevorgyan

A comparative analysis of six intensity models of the direct beam, diffuse and total solar irradiances on a horizontal surface taking into account the sunshine duration is carried out. Verification of the solar radiation intensity models is carried out for the areas where actinometrical stations are situated and operate. As a result of a detailed study of all the models, the selection and correction of the model with the best accuracy are carried out for the conditions of Republic of Armenia. The analysis of the models have shown that the smallest deviation from the statistical data of the actinometrical stations of RA demonstrates Psilog Lou's model for calculating the solar radiation intensity.

Keywords: solar radiation intensity, optical transmission coefficient, sunshine duration, correction factors.