

УДК 621.311.24

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-3-21–28

**Б.Д. Бабаев**

### **Расчет выработки электроэнергии местной солнечной электростанцией при оптимальных параметрах**

*Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; bdbabaev@yandex.ru*

Для проектирования фотоэлектрической системы и использования солнечной энергии необходима оценка её ресурсов для каждой рассматриваемой местности, требуются более точные параметрические данные. Но актинометрическая станция для измерения потока солнечной радиации в районе планируемого строительства отсутствует. В последнее время интенсивное развитие получили различные косвенные методы расчёта солнечной радиации по известным географическим параметрам местности. Рассмотрены принципы автоматизированного расчёта солнечной радиации с учетом отраженной и диффузной составляющих и расчет выработки электроэнергии солнечной электростанцией на широте г. Южно-Сухокумска, где группа компаний «Хевел» намерена запустить солнечную электростанцию с учетом облачности и альбедо при оптимальных углах наклона солнечных модулей для характерных дней летнего и зимнего сезонов. Получена формула определения оптимального угла наклона солнечных панелей для широт  $\varphi = 40\text{--}45^\circ$  в зависимости от дня года.

Ключевые слова: *мощность солнечной радиации, отражённая и диффузная солнечная радиация, широта местности, угол наклона солнечного модуля.*

#### **Актуальность**

Использование солнечной энергии для нужд энергоснабжения потребителей немислимо без оценки её ресурсов, выявления тенденций развития, определения масштабов использования и обоснования рациональных областей применения для каждой рассматриваемой местности. Поток солнечной радиации в России измеряется на актинометрических станциях, которые не охватывают площадку планируемого строительства солнечной электростанции вблизи г. Южно-Сухокумска с прогнозируемым объемом выработки электроэнергии около 20 млн кВт·ч в год. Географические координаты Южно-Сухокумска: 44,67°40' северной широты, 45,63° восточной долготы.

В тех случаях, когда необходимо выполнить расчёт и выбор параметров фотоэлектрической системы для конкретных объектов, требуются более точные данные. Возникает необходимость в увеличении числа актинометрических станций для получения более полной информации о радиационном режиме. Такой метод сопряжен с большими материальными затратами и требует длительного времени для сбора статистических данных. По этой причине в последнее время интенсивное развитие получили различные косвенные методы расчёта интенсивности солнечной радиации по известным географическим параметрам местности [1–5].

### Методика расчёта мощности солнечной радиации на горизонтальную поверхность

Мощность потока солнечной радиации на горизонтальную поверхность в каждый час суток в рассматриваемой точке определяется согласно [1] по формулам:

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (1)$$

$$T_c = \frac{2}{15} [\arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)], \quad (2)$$

$$R_h^i(t) \approx R_h^{\max} \cdot \sin \left( \frac{\pi t'}{T_c} \right), \quad (3)$$

где  $n$  – порядковый номер дня года;  $\delta$  – угол склонения Солнца для  $n$ -ного дня года;  $\varphi$  – географическая широта рассматриваемой точки, град.;  $R_h(t)$  – изменение мощности потока солнечной радиации  $R_h(t)$  в каждый час;  $t'$  – время после восхода Солнца  $0 \leq t' \leq T_c$ , ч;  $T_c$  – продолжительность солнечного сияния;  $R_h^{\max}$  – максимальное значение мощности потока солнечной радиации в течение суток, соответствующее нахождению Солнца в рассматриваемые сутки в наиболее высокой точке (местный полдень), Вт/м<sup>2</sup>;  $i = 1 \dots 24$ .

Зная время полдня в данной местности ( $t_{\text{пол. д}}$ ) и  $T_c$ , находим время восхода и захода Солнца соответственно по формулам (4) и (5):

$$t_{\text{вос}} = t_{\text{пол. д}} - \frac{T_c}{2}, \quad (4)$$

$$t_{\text{зах}} = t_{\text{пол. д}} + \frac{T_c}{2}. \quad (5)$$

Значение  $R_h^{\max}$  для каждого дня в рассматриваемой точке определяется по формуле

$$R_h^{\max} = R_{\max}^{22.06} \cdot \cos \Theta, \quad (6)$$

где  $R_{\max}^{22.06}$  – максимальное значение мощности потока солнечной радиации в году, Вт/м<sup>2</sup>;  $\cos \Theta$  – величина, определяемая по формуле, учитывающей горизонтальное расположение площадки, град., т. е. [2]:

$$\cos \Theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \omega \cdot \cos \delta. \quad (7)$$

Часовой угол Солнца  $\omega$  – в рассматриваемой точке, град.,

$$\omega = 15 \cdot (t - t_{\text{cc}}) + (\psi - \psi_{\text{зона}}), \quad (8)$$

где  $t$  – фактическое местное декретное время, ч;  $t_{\text{cc}}$  – декретный полдень данного часового пояса, ч;  $\psi$  – фактическая долгота точки, град.;  $\psi_{\text{зона}}$  – долгота зоны, град.

Суточный поток мощности солнечной радиации  $R_{\text{сут}}$  (кВт/м<sup>2</sup>) на горизонтальную поверхность при условии, что небо над рассматриваемой точкой прозрачное (ясное), определяется по формуле

$$R_{h \text{ сут}} = \left( \sum_{i=1}^{24} R_h^i \right) \cdot 10^{-3}. \quad (9)$$

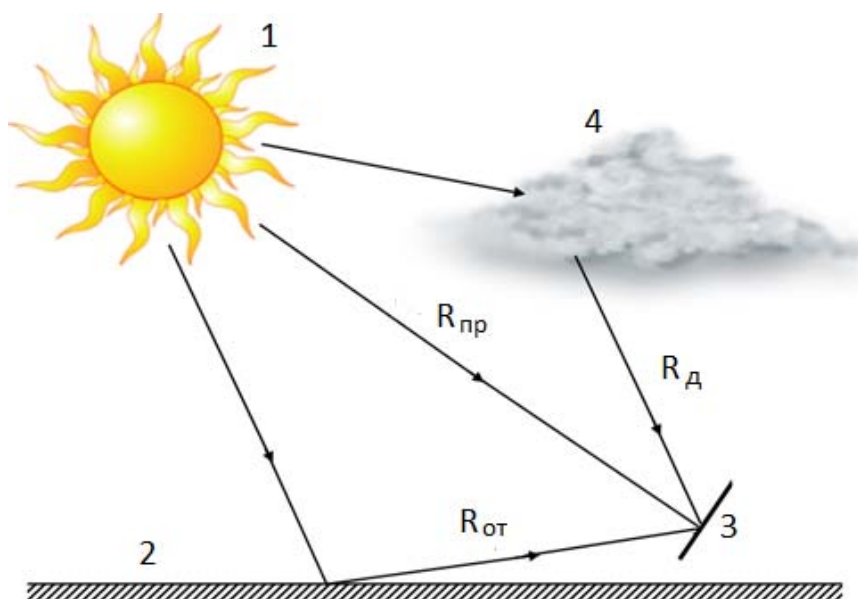


Рис. 1. Составляющие солнечного излучения, падающие на наклонную поверхность: 1 – Солнце; 2 – поверхность Земли; 3 – приёмная площадка; 4 – облака, аэрозоли, пыль

### Расчёт диффузной составляющей солнечной радиации

Расчёт диффузной составляющей солнечной радиации (рис. 1) определяется коэффициентом диффузии  $K_d$ , равным отношению мощности диффузной составляющей солнечной радиации к мощности солнечной радиации на горизонтальную площадку.

Значение  $K_d$  определяется по формуле [1]

$$K_d = 1,39 - 4,03 \cdot K_0 + 5,53 \cdot K_0^2 - 3,11 \cdot K_0^3, \quad (10)$$

где  $K_0$  – коэффициент прозрачности атмосферы, рассчитываемый по формуле

$$K_0 = \frac{R_{h \text{ сут}}}{R_{hA}}, \quad (11)$$

где  $R_{hA}$  – поток суточной солнечной радиации на горизонтальную площадку за пределами атмосферы.

Значение  $R_{hA}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{hA} = 24/\pi \cdot e_0 \cdot \left\{ \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360+n}{365} \right) \right] \cdot \left[ \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left( \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \right) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right] \right\}, \quad (12)$$

где  $e_0$  – солнечная постоянная, равная  $1,360 \text{ кВт/м}^2$ .

### Расчёт оптимального угла наклона солнечных модулей в зависимости от широты местности и номера дня

По мнению специалистов, оптимальным углом наклона приёмника солнечной радиации считается угол, равный широте местности. Однако в действительности этот угол оптимален только для весны и осени.

В ходе расчётов выявлено, что оптимальный угол наклона приёмника солнечной радиации зависит от широты местности и номера дня [6].

Исходя из этого определены оптимальные углы наклона, соответствующие середине каждого месяца для широт  $40-45^\circ$  (широта Южно-Сухокумска  $44^\circ 40'$ ).

При этом оптимальные углы наклона приёмника солнечной радиации определены по максимальному значению  $R_{\beta}^i$  для среднего дня каждого месяца. После этого составлены графики зависимостей оптимального угла наклона от номера дня для приведённых интервалов широт (рис. 2).

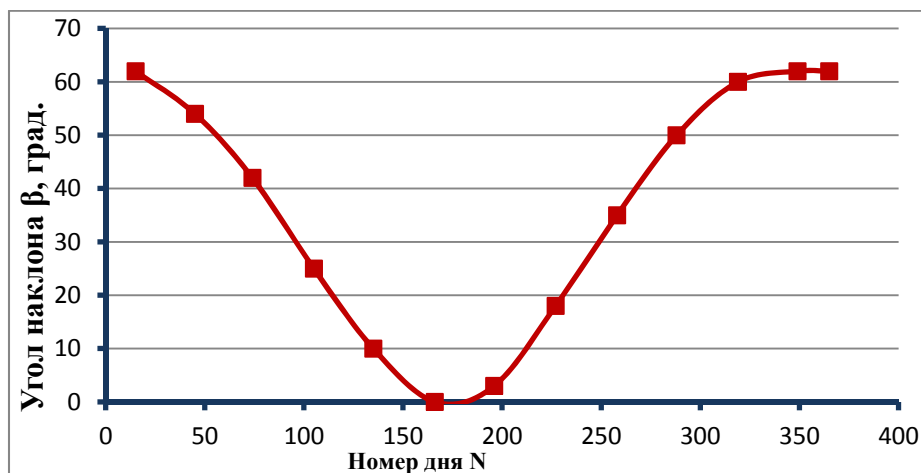


Рис. 2. Зависимости оптимального угла наклона приемника солнечной радиации от номера дня для интервалов широт  $40 \div 45^\circ$

Согласно построенным графикам выведены уравнения, которые позволяют определить оптимальный угол наклона для приведённых интервалов широт в любой день года.

Оптимальный угол наклона приёмника солнечной радиации для широт  $\varphi = 40-45^\circ$  в зависимости от дня года определяется уравнением

$$\beta = 3,192 \cdot 10^{-12} \cdot N^6 - 3,401 \cdot 10^{-9} \cdot N^5 + 1,274 \cdot 10^{-6} \cdot N^4 - 1,921 \cdot 10^{-4} \cdot N^3 + 1,038 \cdot 10^{-2} \cdot N^2 - 0,4786 \cdot N + 67,41, \quad (11)$$

где  $N$  – порядковый номер рассматриваемого дня года.

### Расчёт мощности солнечной радиации и выработки электроэнергии с учётом диффузной и отражённой составляющих, коэффициента облачности и альбедо

Ориентация приёмных поверхностей на определённый оптимальный угол к горизонту позволяет максимально улавливать поступающее солнечное излучение. Расчёт мощности потока солнечной радиации на наклонную площадку  $R_{\beta}^i(t)$  ( $\text{Вт/м}^2$ ) проведём по методу Лью и Джордана [2].

Формула (3) позволяет получить значения потока мощности прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную площадку. В действительности полное солнечное излучение состоит из трёх составляющих – прямого, диффузного и отражённого от Земли излучения (рис. 1).

Таким образом, поток мощности солнечной радиации  $R_{\beta}^i(t)$  на наклонённую под углом  $\beta$  площадку определяется по формуле

$$R_{\beta}^i(t) = K_{\Sigma} \cdot R_h^i(t) = R_{\text{пр}\beta}^i(t) + R_{\text{д}\beta}^i(t) + R_{\text{от}\beta}^i(t), \quad (14)$$

где  $K_{\Sigma}$  – отношение суточных дневных приходов суммарной радиации на наклонную и горизонтальные поверхности, рассчитываемое по формуле:

$$K_{\Sigma} = [(1 - K_d) \cdot K_{пр}] + \left[ K_d \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] + \left[ \rho \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} \right], \quad (15)$$

где  $\rho$  – отражательная способность подстилающей поверхности Земли (альбедо). Значение альбедо разных поверхностей представлено в [1].

$K_{пр}$  – значение, равное отношению суточных приходов прямой солнечной радиации на наклонную и горизонтальные площадки, определяемое формулой Клейна:

$$K_{пр} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega'_s + \pi/180 \cdot \omega'_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \pi/180 \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta}, \quad (16)$$

где  $\omega_s$  – часовой угол захода Солнца на горизонтальной площадке, град., равный

$$\omega_s = [\text{Arccos}(-\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta)], \quad (17)$$

$\omega'_s$  – часовой угол захода Солнца на наклонной площадке:

$$\omega'_s = \min[\omega_s; \text{Arccos}(-\text{tg}(\varphi - \beta) \cdot \text{tg}\delta)]. \quad (18)$$

В конечном итоге формула для определения мощности потока солнечной энергии на наклонную площадку в каждый час для рассматриваемой точки с учётом облачности будет иметь вид

$$R_{\beta}^i(t) = K_{\Sigma} \cdot R_h^i(t) \cdot K_{прох}, \quad (19)$$

где  $K_{прох}$  – коэффициент, учитывающий долю прохода солнечной радиации на наклонную площадку при облачности, определяется он по формуле

$$K_{прох} = \frac{(10 - K_{об})}{10}, \quad (20)$$

где  $K_{об}$  – коэффициент облачности (%), значение которого меняется от 0 (ясное небо) до 10 (пасмурно, небо полностью покрыто облаками, без единого голубого просвета).

Разработанный алгоритм и программа [7] позволяют все приведенные выше расчеты проводить автоматизированно.

### Расчёт выработки электроэнергии солнечной электростанцией в зоне Южно-Сухокумска

По приведённой методике компьютерная программа [8] автоматизированно рассчитала оптимальные углы наклона солнечных панелей, мощности солнечной радиации на наклонную и горизонтальную площадки с учётом диффузной и отражённой составляющей и выработку электроэнергии при КПД солнечных панелей 0,2 по часам в характерные летний (15 августа) и зимний (7 января) дни для широты и долготы г. Южно-Сухокумска (рис. 3 и 4).

Form2

Текущая дата: 15.08.2021

Широта местности: 44,67 град.

Долгота местности: 45,63 град.

Декретный полдень: 13 ч.

Макс. СР в году: 900 Вт/м<sup>2</sup>

Облачность: 0,59

Альbedo: 0,15

Площадь СЭС, м<sup>2</sup>: 1

КПД СЭС: 0,2

Площадь ССТ, м<sup>2</sup>: 0

КПД ССТ: 0

Время, ч:

Время, ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
СР на горизонтальную поверхность, Вт/м <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	173,42	336,01	485,32	607,83	699,33	735,09	772,28	790,83	809,47	793,70	747,80	617,82	431,42	20,000	0	0	0	0
СР на наклонную поверхность, Вт/м <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	171,64	334,52	480,31	601,57	692,11	747,29	764,31	742,29	682,35	587,57	462,78	314,34	149,86	0,000	0	0	0	0
Выработка СЭС, кВт*ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Выработка ССТ, кВт*ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Склонение Солнца: 13,8 град.

Продолжительность солнечного дня, ч: 13,9

Оптимальный угол наклона: 16 град.

Вычислить

Обнулить

Рис. 3. Окно программы автоматизированного расчёта солнечной радиации на горизонтальную и наклонную площадки и выработки электроэнергии солнечными панелями площадью 1 м<sup>2</sup> в характерный день летнего сезона для широты г. Южно-Сухокумска

Form2

Текущая дата: 07.01.2021

Широта местности: 44,67 град.

Долгота местности: 45,63 град.

Декретный полдень: 12 ч.

Макс. СР в году: 900 Вт/м<sup>2</sup>

Облачность: 0,67

Альbedo: 0,6

Площадь СЭС, м<sup>2</sup>: 1

КПД СЭС: 0,2

Площадь ССТ, м<sup>2</sup>: 0

КПД ССТ: 0

Время, ч:

Время, ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
СР на горизонтальную поверхность, Вт/м <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	122,55	229,61	307,65	346,81	342,14	294,23	209,13	97,603	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0
СР на наклонную поверхность, Вт/м <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	310,37	581,52	779,18	878,36	866,52	745,18	529,65	247,19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0
Выработка СЭС, кВт*ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Выработка ССТ, кВт*ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Склонение Солнца: -22,4 град.

Продолжительность солнечного дня, ч: 8,8

Оптимальный угол наклона: 65 град.

Вычислить

Обнулить

Рис. 4. Окно программы автоматизированного расчёта солнечной радиации на горизонтальную и наклонную площадки и выработки электроэнергии солнечными панелями площадью 1 м<sup>2</sup> в характерный день зимнего сезона для широты г. Южно-Сухокумска

Как видно, при КПД солнечных панелей 0,2, облачности 0,59, альbedo 0,15 и при оптимальном угле наклона солнечных панелей 16°, для 15 августа суточная выработка составляет 1,2 кВт·ч/м<sup>2</sup>. А 7 января при облачности 0,67, альbedo 0,6 и при оптимальном угле наклона солнечных панелей 65° суточная выработка составляет 1,0 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Годовая расчетная выработка электроэнергии с 1 м<sup>2</sup> в среднем составит  $(183 \times 1,2 + 182 \times 1,0 = 401,6)$  401,6 кВт·ч/ (м<sup>2</sup>·год).

При проектировании солнечных электростанций необходимо иметь в виду зависимость режима генерации электроэнергии от времени суток и природных

условий. Для стабильного энергоснабжения потребителей имеет большое значение выбор методов и материалов аккумулирования энергии [9]. В последнее время более экономичным является строительство сетевых солнечных электростанций, при котором традиционная энергетика должна помочь солнечной энергетике [10].

Таким образом, при коэффициенте заполнения солнечных панелей 0,95, прогнозируемом объеме выработки электроэнергии около 20 млн кВт·ч в год потребуется 52 421 м<sup>2</sup> солнечных панелей. Суточная выработка электроэнергии солнечной электростанцией в летний день составит 59,76 МВт·ч/сут., а в зимний месяц составит 49,8 МВт·ч/сут. при изменении углов наклона панелей. При неизменном «оптимальном» угле (обычно равном широте местности) наклона панелей значения вырабатываемой энергии будут меньше.

### Литература

1. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
2. Елистратов Е.Е., Аронова Е.С. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2012. – 164 с.
3. Маслова А.А., Осокин В.Л., Сбитнев Е.А. Анализ интенсивности солнечной радиации // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2015. – № 4 (47). – С. 56–62.
4. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution // Solar System Research. – 2016. – V. 50, № 3. – Pp. 220–224.
5. Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // Космические исследования. – 2019. – Т. 57, № 3. – С. 177–184.
6. Бабаев Б.Д., Шевердиев Р.П. Оптимизация угла наклона солнечных модулей в зависимости от места расположения и автоматизированный расчет солнечной радиации // Энергетик. – 2018. – № 12. – С. 29–31.
7. Бабаев Б.Д. Программа расчета поступления возобновляемых энергоресурсов и оптимизации режимов эксплуатации энергокомплексов по динамике нагрузки потребителя // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: материалы XIV Международной научно-технической конференции (г. Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г.). – Саратов: Издательство Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, 2018. – С. 55–60.
8. Бабаев Б.Д., Шевердиев Р.П. Оптимизация состава энергокомплекса. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663797. Заявка № 2017660848. Дата поступления: 26.10.2017 г.
9. Babaev B.D., Kharchenko V.V., Panchenko V.A., Pandian V. Materials and methods of energy storage in power supply systems of agricultural facilities. Materials and methods of thermal energy storage in power supply systems // Renewable energy and power supply challenges for Rural Regions. – Hershey, PA, USA: IGI Global, 2019. – Pp. 115–135.

10. Бабаев Б.Д. Волианик В.В. Традиционная энергетика должна помочь нетрадиционной. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: материалы XI Школы молодых ученых им. чл.-корр. РАН Э.Э. Шпильрайна (г. Махачкала, 15–18 октября 2018 г.) / под ред. д. тех. н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: Алеф, 2018. – С. 435–437.

*Поступила в редакцию 10 июня 2021 г.*

UDC 621.311.24

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-3-21–28

### **Calculation of Electricity Generation by a Local Solar Power Plant With Optimal Parameters**

***B.D. Babaev***

*Dagestan State University; Russia, 367000, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a;  
bdbabaev@yandex.ru*

For the design of a photovoltaic system and the use of solar energy, it is necessary to estimate its resources for each area under consideration, and more accurate parametric data are required. However, there is no actinometric station for measuring the flow of solar radiation in the area of the planned construction. Recently, various indirect methods for calculating solar radiation based on known geographical parameters of the area have been intensively developed. The article discusses the principles of automated calculation of solar radiation, taking into account the reflected and diffuse components, and the calculation of electricity generation by a solar power plant at the latitude of Yuzhno-Sukhokumsk, where the «Hevel» group of companies intends to launch a solar power plant, taking into account cloud cover and albedo at optimal angles of inclination of solar modules for typical days of the summer and winter seasons. The formula for determining the optimal angle of solar panels inclination for latitudes  $\varphi = 40\text{--}45^\circ$ , depending on the day of the year, is obtained.

*Keywords: solar radiation power, reflected and diffuse solar radiation, latitude of the area, angle of inclination of the solar module.*

*Received 10 June 2021*