

Оценка ресурсов солнечной энергии для снабжения наземных систем обеспечения полетов в республике Мьянма

Пчельникова-Гротова О.Н.*, Мин Мин Тхо**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: grotova@mail.ru*

***e-mail: minminthaw50@gmail.com*

Аннотация

Проведен расчет гарантированного среднемесячного прихода солнечной радиации на территории Мьянмы. Исследовано влияние угла наклона приемника солнечной радиации на приход солнечного излучения и выбран оптимальный угол наклона приемника.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, фотоэлектрическая установка.

Для некоторых объектов, удаленных от энергосистем на значительные расстояния, возможно только автономное электроснабжение, так как подключение их к централизованной системе требует больших капитальных затрат, связанных со строительством и эксплуатацией протяженных линий электропередачи. Для таких объектов стоимость электроэнергии, получаемой от возобновляемых источников

энергии, становится соизмеримой со стоимостью электроэнергии, получаемой от энергосистем, и этот фактор перестает быть сдерживающим для применения возобновляемых источников энергии. Кроме того, автономные топливные электростанции имеют более низкое качество электроэнергии, и в этой связи энергоустановки на возобновляемых источниках энергии приобретают большие перспективы выдержать конкуренцию.

Мьянма является небольшим, но активно развивающимся государством юго-восточной Азии. В топливно-энергетическом комплексе страны в настоящее время самой актуальной проблемой является дефицит электроэнергии. Мьянма находится в экваториальной зоне юго-восточной Азии на берегу Индийского океана и обладает огромным потенциалом возобновляемых энергетических ресурсов: солнечными, ветровыми, приливыми. Поэтому существует благоприятная возможность использовать для снабжения удаленных автономных наземных систем обеспечения полетов электростанции на основе альтернативных источников энергии.



Рис. 1. Географическое положение республики Мьянма

Наиболее мощным источником возобновляемой энергии является Солнце. На поверхность Земли за год поступает приблизительно $4 \cdot 10^{17}$ кВт·ч солнечной энергии. Это превышает самые смелые прогнозы мирового энергопотребления в 21 веке в сотни раз. Солнечная энергия, в зависимости от сезона года может использоваться на всей территории Земного шара. Однако существуют климатические зоны с большим годовым количеством солнечных часов, на территории которых применение солнечной энергии наиболее эффективно, к таким климатическим зонам относится территория республики Мьянма [1]. Солнечная энергия является самым большим ресурсом энергии в Мьянме и может рассматриваться как источник для решения энергетических проблем.

Текущие значения интенсивности солнечного излучения и продолжительности их действия зависят от широты местности, климатической зоны, времени года и суток, и других факторов. В силу этого они носят случайный характер, поэтому вероятность его интенсивности соответствует вероятности попадания случайной величины в заданный интервал :

$$P(N_x \leq N \leq N_{\max}) = \int_{N_x}^{N_{\max}} N(t) dt$$

где $P(N_x \leq N \leq N_{\max})$ – вероятность того, что интенсивность солнечного излучения будет находиться в интервале $N_x \dots N_{\max}$; N_x – гарантированная интенсивность солнечного излучения, Вт/м²; N_{\max} – максимально возможная интенсивность солнечного излучения в данной местности, Вт/м².

Если интенсивность солнечного излучения распределена по нормальному закону, что имеет место на территории республики Мьянма, то искомую вероятность можно определить, используя функцию Лапласа [2]:

$$P(N_x \leq N \leq N_{\max}) = \Phi \left\{ \frac{(N_{\max} - M[N])}{\sigma_c} \right\} - \Phi \left\{ \frac{(N_x - M[N])}{\sigma_c} \right\}$$

где – $M[N]$ математическое ожидание интенсивности солнечного излучения (данные метеостанций), Вт/м²; σ_c – стандартное отклонение интенсивности солнечного излучения, определяемое из условия симметрии нормального распределения $0,5 = \Phi\{M[N]/\sigma_c\}$ Вт/м².

Таким образом, на основании метеоданных по республике Мьянма [3] получены значения гарантированного среднемесячного прихода солнечной радиации (СР) в основных городах Мьянмы (кВт·ч/м²/сутки) (табл. 1).

Таблица 1

Город	Месяц					
	I	II	III	IV	V	VI
Муньюа	4,45	5,63	6,11	6,47	6,09	5,45
Мейтхила	4,55	5,64	6,25	6,64	5,98	4,97
Магуэ	4,90	5,52	6,06	6,50	5,91	5,08
Лашо	4,45	5,71	6,07	6,07	5,71	4,91
Мандалай	4,50	5,71	6,06	6,33	5,97	5,45
Пьи	4,79	5,88	6,12	6,19	5,61	4,45
Мьичина	4,16	5,05	5,56	5,82	5,48	4,07
Ситун	4,65	5,68	5,84	6,49	5,42	3,78
Янгон	4,92	5,77	6,04	6,40	4,92	3,70
Тавой	5,06	5,82	6,00	6,29	4,85	4,68
Ко Таунг	5,07	5,52	5,93	6,09	4,71	3,61
Город	Месяц					
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Муньюа	4,93	4,66	4,75	4,37	4,11	4,05
Мейтхила	4,84	4,79	4,79	4,55	4,21	4,05

Магуэ	4,83	4,79	4,90	4,69	4,16	4,31
Лашо	4,34	4,29	4,52	4,23	4,00	3,84
Мандалай	4,88	4,64	4,70	4,34	4,07	3,99
Пьи	4,22	4,21	4,56	4,58	4,35	4,28
Мьичина	3,69	4,18	4,31	4,15	3,83	3,78
Ситун	3,54	3,73	4,40	4,70	4,29	4,31
Янгон	3,41	3,50	4,05	4,63	4,52	4,47
Тавой	3,41	3,33	4,04	4,86	4,94	4,84
Ко Таунг	3,30	3,27	3,85	4,72	4,70	3,54

На рис. 2 приведена карта топоиний, показывающая среднегодовой гарантированный приход солнечной радиации на горизонтальную приёмную площадку для всей территории Мьянмы в кВт·ч/м² в сутки.

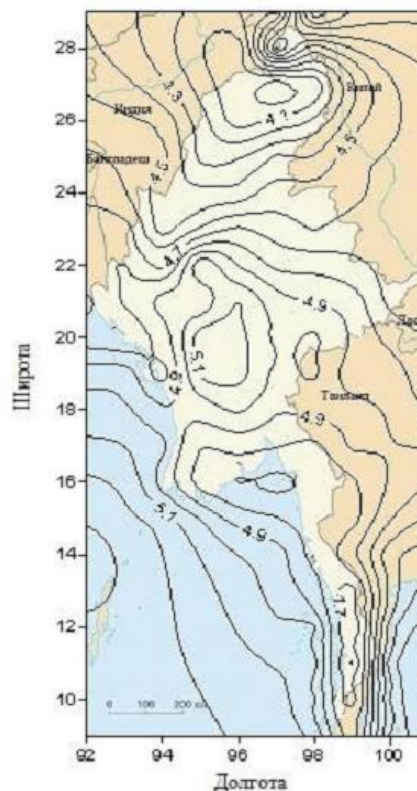


Рис. 2. Карта топоиний среднегодового суточного прихода солнечной радиации на горизонтальную приёмную площадку (кВт·ч/м²/сутки)

Повышать приход солнечной радиации путем ориентации угол наклона приемной площадки. В мировой практике обычно солнечные модули, используемые для энергоснабжения автономных потребителей, фиксированы постоянно на оптимальных углах наклона [4]. Поэтому необходимо провести расчеты оптимального угла приемника СР с целью максимизации прихода солнечной радиации в течение года в целом и при месячной оптимизации этого угла.

Интенсивность солнечного излучения зависит от взаимной ориентации Солнца и солнечного коллектора. Параметры ориентации солнечного коллектора в северном полушарии Земли показаны на рис. 3. На рисунке азимутальный угол Солнца равен нулю, то есть Солнце по отношению к наблюдателю, находящемуся в северном полушарии, расположено строго на юге.

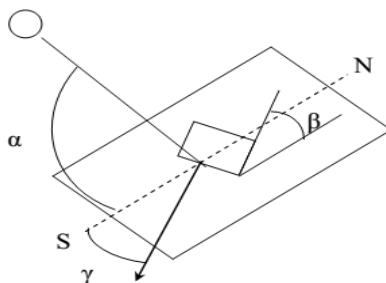


Рис. 3. Параметры ориентации солнечного коллектора: α – угол солнцестояния; β – угол наклона коллектора; γ – азимутальный угол коллектора; γ_c – азимутальный угол Солнца

Проведем расчет оптимального угла приемника СР для точки А с координатами $\varphi=14,02^\circ$ и $\psi=98,2^\circ$. Среднегодовое значение энергии суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную площадку земли \mathcal{E}_Σ^r (кВт·ч/м²) в месяц приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные к расчету прихода СР

Месяц	I	II	III	IV	V	VI
\mathcal{E}_{Σ}^r , кВт·ч/м ²	153,1	154,2	181	178,2	149	119,3
Месяц	VII	VIII	IX	X	XI	XII
\mathcal{E}_{Σ}^r , кВт·ч/м ²	128,7	120,9	122,2	142,1	147,2	157,3

Приход суммарной энергии солнечной радиации на произвольно ориентированную приемную площадку рассчитывается по формуле [5]:

$$\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta} = K_{\Sigma}^{\beta} \times \mathcal{E}_{\Sigma}^e$$

где K_{Σ}^{β} – коэффициент отношения суммарной солнечной радиации, приходящейся на площадку, расположенную под углом β , к суммарной солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную площадку; \mathcal{E}_{Σ}^e – суммарная энергия солнечной радиации, падающей на горизонтальную площадку земли (кВт·ч/м²).

Поскольку Мьянма лежит на широтах ($9^{\circ} \leq \varphi \leq 28^{\circ}$), то для расчета коэффициента K_{Σ}^{β} использована формула, приведенная в методике NASA [6]

$$K_{\Sigma}^{\beta} = (1 - K_{\vartheta}^e) K_{np} + K_{\vartheta}^e \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right),$$

где $K_{\vartheta}^e = \frac{\mathcal{E}_{\vartheta}^e}{\mathcal{E}_{\Sigma}^e}$ – коэффициент отношения суммарной диффузной солнечной радиации к суммарной солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную площадку; K_{np} – коэффициент прямой солнечной радиации; ρ – альbedo отражающей поверхности ($\rho = 0,3$ для данной местности); β – угол наклона приемной площадки.

K_{np} находим по формуле:

$$K_{np} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{\beta} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\beta} \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{\alpha} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\alpha} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta},$$

где φ – фактическая широта точки А; δ – склонение солнца в данные сутки n ; ω_{α} и ω_{β} – часовые углы захода Солнца на горизонтальной и наклонной приемных площадках.

Склонение солнца определяется по формуле [7]:

$$\delta = \delta_0 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right),$$

где $\delta_0 = 23^{\circ} 45'$ для северного полушария; n – номер суток с начала года.

Часовые углы захода солнца на горизонтальной и наклонной приёмных площадках определяются по формулам:

$$\omega_{\alpha} = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta);$$

$$\omega_{\beta} = \min[\omega_{\alpha}; \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta)].$$

Результаты расчета среднегодового прихода солнечной радиации ($\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$) на приемную площадку, расположенную под разными углами, для точки А ($\varphi = 14,02^{\circ}$, $\psi = 98,2^{\circ}$) приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

β°	10	20	30	40	50	60	70	80
Ξ_{Σ}^{β}	1756,3	1803,5	1813,0	1769,4	1693,2	1585,7	1449,8	1291,3

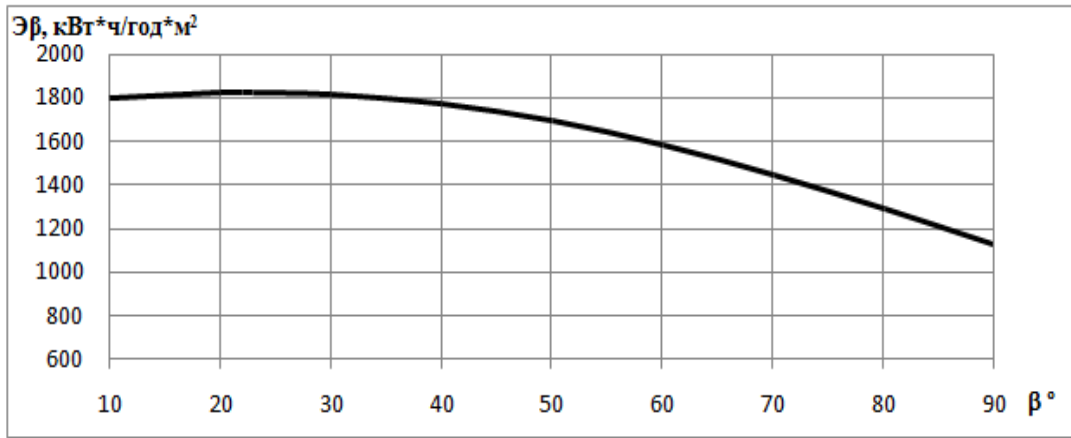


Рис. 4. Изменение суммарного прихода солнечной радиации на площадку, расположенную под углом β

Угол наклона приемной площадки считается оптимальным, если приход солнечной радиации при этом угле является максимальным. Из таблицы видно, что наибольшее значение $\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}$ (кВт·ч/м²) получим при расположении приемной площадки под углом от 20° до 30°. Проведем более детальные расчеты, результаты которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

β	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}$	1810,3	1824,4	1824,1	1823,8	1822,4	1821,9	1819,1	1817,6	1815,4

Таким образом, наилучшим углом для приемной площадки солнечной фотоэлектрической установки в точке А ($\varphi=14,02^{\circ}$, $\psi=98,2^{\circ}$) является угол $\beta = 22^{\circ}$.

Результаты расчета оптимальных углов наклона приемной площадки β и прихода солнечной радиации (кВт·ч/м²) при среднегодовом оптимальном угле

установки приемника солнечной радиации в регионах республики Мьянма приведены на рис. 5 (а, б).

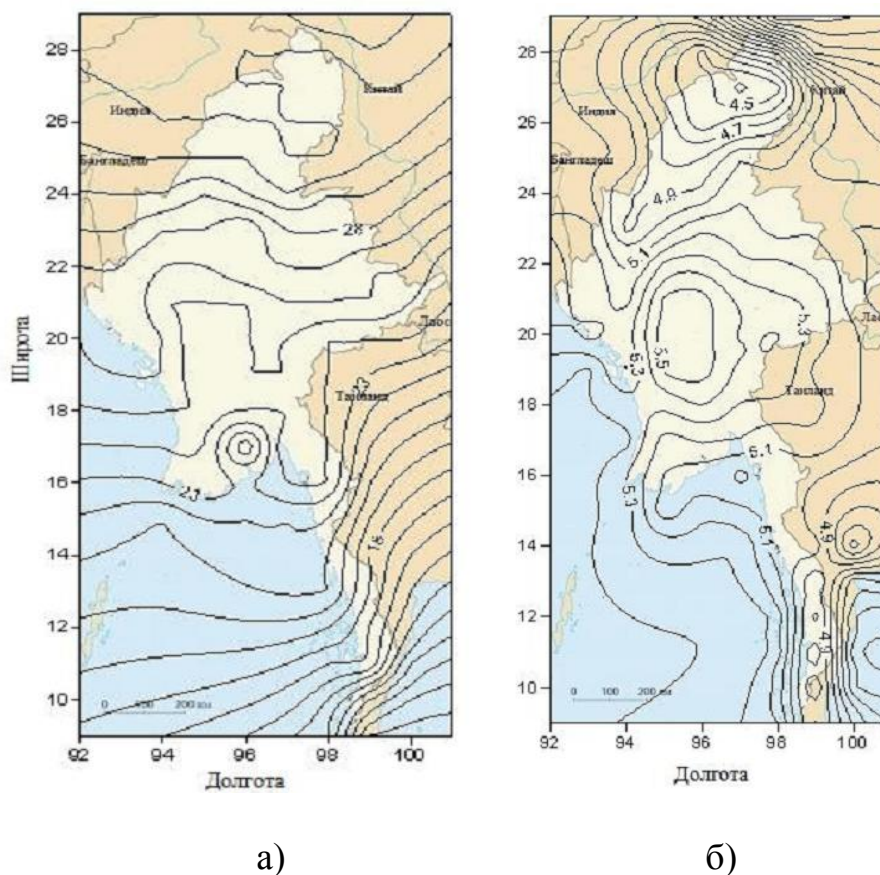


Рис. 5. Результаты расчета оптимальных углов β наклона приемной площадки (а) и прихода солнечной радиации ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) при среднегодовом оптимальном угле установки приемника (б)

Увеличение прихода солнечной радиации при этом зависит от местной широты. Чем больше широта местности, тем больше это увеличение при оптимизации угла наклона приемной площадки СР. Из анализа данных, представленных на рис. 5 следует, что при среднегодовом оптимальном угле установки приемника приход солнечной радиации заметно увеличивается практически везде, кроме в южных регионов Мьянмы. Увеличение прихода СР во многих южных регионах Мьянмы составляет около 3%, но в центральных регионах

республики приход СР увеличивается на 8-9 %, а в северных регионах даже на 13%. В этом случае увеличение прихода СР по всей территории Мьянмы составляет в среднем 8,7%.

Значение среднегодовых оптимальных углов приемника СР приближается к значению местной широты, но не всегда равны ей. Из рис. 5 следует, что на большинстве территории Мьянмы значения среднегодовых оптимальных углов приемника СР больше значения местной широты примерно на 5 градусов. Поэтому для условий Мьянмы можно рассчитывать среднегодовой оптимальный угол $\beta_{год}$ по формуле $\beta_{год} = \varphi + 5^\circ$.

Аналогично были рассчитаны среднемесячные оптимальные углы $\beta_{мес}$ приемника СР на территории Мьянмы. В южных регионах эти углы равны нулю для 5 месяцев года, в остальных регионах – для 4 месяцев. Изменение углов $\beta_{мес}$ в разных регионах страны показано на рис. 6.

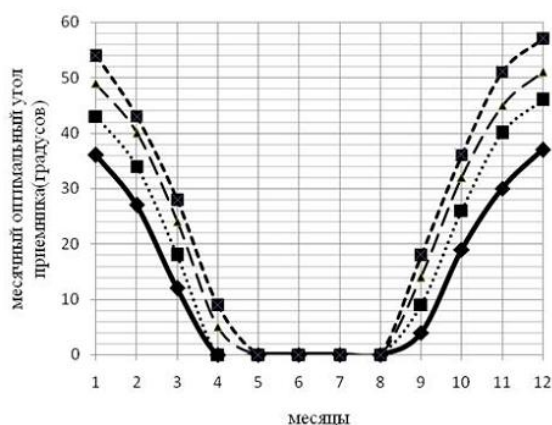


Рис. 6. Среднемесячные оптимальные углы приемника СР в ряде регионов Мьянмы (—■— оптимальный угол в точке $\varphi=9^\circ, \psi=99^\circ$;■..... оптимальный угол в точке $\varphi=15^\circ, \psi=99^\circ$; —▲— оптимальный угол в точке $\varphi=20^\circ, \psi=99^\circ$; - - -■- - - оптимальный угол в точке $\varphi=25^\circ, \psi=99^\circ$)

При установке приемника СР под углом $\beta_{\text{мес}}$ приход солнечной энергии существенно больше не только, чем при горизонтальной установке приемника СР, но и при установке приемника под углом $\beta_{\text{год}}$. В этом случае южных регионах приход СР увеличивается на 8 % по сравнению с приходом на горизонтальном приемнике СР, а в северных регионах – на 20 %. Увеличение прихода СР по всей территории Мьянмы составляет в среднем 16,5 %. Это почти 2 раза больше чем увеличение прихода СР при угле $\beta_{\text{год}}$ установки приемника. Однако, в этом случае необходимо ориентировать приемник солнечной радиации 9 раз в год в южных регионах страны и 8 раз в остальных регионах. Для этого требуются специальные технические устройства из-за чего стоимость фотоэлектрической установки может увеличиться примерно на 6 %. Так как в Мьянме с апреля по август $\beta_{\text{мес}} = 0$, а в сентябре $\beta_{\text{мес}} \approx 0$, то можно ориентировать приемник СР только в 2 раза в год: в жаркий сезон (с апреля по сентябрь) – горизонтальное положение приемника СР, в прохладный сезон (с октября по март) – наклоненное положение приемника СР (угол приемника СР $\beta_{\text{сез}}$). В табл. 6 приведены результаты расчета годового прихода солнечной радиации $\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}$ (кВт·ч/м²) при различных углах β установки приемника СР в городах Мьянмы.

Таблица 5

Город		Мьяичина	Мандалай	Пьи	Янгон	Мьей	
Широта (градус)		25	21	19	16	12	
Приход СР при угле β наклон приемника СР (кВт·ч/м ²)	$\beta = 0$	СР	1568	1800	1846	1737	1745
	$\beta_{\text{год}}$	СР	1765	1959	1993	1865	1822
		% ув.	12,6	8,3	7,9	7,7	4,1
	$\beta_{\text{мес}}$	СР	1882	2094	2127	1969	1920
		% ув.	20,3	16,3	15,2	13,5	10,3
	$\beta_{\text{сез}}$	СР	1861	2074	2106	1951	1912
% ув.		18,8	15,2	14,1	12,3	9,6	

Сопоставив приход СР при различных углах установки приемника СР в городах Мьянмы, можно сделать вывод, что приход СР при установке приемника СР под углом $\beta_{\text{сез}}$ уменьшается во всех регионах Мьянмы приблизительно на 1 % по сравнению с приходом СР при установке приемника СР под углом $\beta_{\text{мес}}$. Поэтому лучшим вариантом является ориентация приемника СР по сезонам дважды в год, что позволяет без дополнительных затрат на усложнение фотоэлектрической установки получить существенное увеличение прихода солнечной энергии на приемнике СР.

Библиографический список

1. Thet Thet Han Yi, Su Su Win, Nyein Nyein Soe. Solar Energy potential and application in Myanmar. World Academy of Science, Engineering and Technology, 42, 2008. P.(35-40).

2. Щипачев В.С. Высшая математика. Базовый курс: учебное пособие для бакалавров. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 447 с.
3. Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0). <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
4. Фолькер Куашнинг. Системы возобновляемых источников энергии. Технологии. Расчеты. Моделирование: учебник. – Астана: Издательство Фолиант, 2013. – 432 с.
5. Малинин Н.К, Виссарионов В.И, Дерюгина Г.В, Кузнецова В.А. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.– 275 с.
6. Лин Аунг Тет, Малинин Н.К, Шестопалова Т.А. Исследование информационного обеспечения гелиоэнергетических расчетов и ресурсов солнечной энергии Мьянмы // Вестник МЭИ. 2014, №1. С. 43-49.
7. Елистратов В.В. Использование возобновляемой энергии: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 224 с.