

Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных

В.А. Шакиров

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
mynovember@mail.ru

Статья поступила 2.08.2017, принята 4.10.2017

Проекты использования солнечной энергии требуют большого внимания к оценке суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности. Проводимые в настоящее время исследования в основном не учитывают рассеянную и отраженную радиацию и основываются на данных о погоде, полученных за период 1936–1980 гг. К настоящему времени многолетние статистически необработанные данные о погоде в населенных пунктах могут быть получены на интернет-ресурсах. Благодаря совершенствованию средств измерения данные о погоде последних лет позволяют учесть климатические изменения, произошедшие за последние десятилетия. Предлагается методика оценки суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности, с использованием многолетних архивов метеорологических данных. Рассматривается методика оценки солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, с использованием формулы Кастрова. Учет рассеянной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, проводится по формуле Берлаге. Рассматриваются две модели оценки рассеянной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности — Хей и Клачера. Для оценки отраженной солнечной радиации используется изотропная модель. Рассматриваются две модели учета облачности — по общей облачности, а также по общей и нижней облачности. Представлены результаты оценки средней за месяц общей и нижней облачности за период с 2005 по 2016 гг. Приводятся результаты оценки прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации, поступающей на наклонную под углом широты местности поверхность для с. Оленёк (Республика Саха (Якутия)).

Ключевые слова: солнечная энергия; рассеянная радиация; отраженная радиация; облачность.

A technique for estimating global solar radiation on inclined surfaces using multi-year archives of meteorological data

V.A. Shakirov

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
mynovember@mail.ru

Received 2.08.2017, accepted 4.10.2017

Projects for the use of solar energy require great attention to the assessment of total solar radiation entering inclined surfaces. Current research generally does not take into account diffuse and reflected radiation entering inclined surfaces. In addition, many studies are based on weather data obtained during the period 1936–1980. To date, long-term statistically unprocessed weather data in populated areas can be obtained on Internet resources. By improving the means of measurement, weather data from recent years make it possible to take into account the climatic changes that have occurred in recent decades. A technique is proposed for estimating the total solar radiation arriving at inclined surfaces using multi-year archives of meteorological data. A technique for estimating solar radiation arriving at a horizontal surface using the Kastrov formula is considered. Accounting for the diffuse radiation entering the horizontal surface is carried out according to the Berlage formula. The Hay's and Klucher's models for estimating the diffuse solar radiation entering the inclined surfaces are considered. An isotropic model is used to estimate the reflected solar radiation. Two models of cloud accounting are considered: for total cloud cover, and for general and lower cloud cover. The results of estimating the average monthly average and lower cloud cover for the period from 2005 to 2016 are presented. The results of the estimation of direct, diffuse and reflected solar radiation arriving at a slope at an angle of latitude of the terrain for the village of Olenyok of the Republic of Sakha (Yakutia) are given.

Keywords: solar energy; diffuse radiation; reflected radiation; cloud cover.

Введение

Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 г. существенная роль отводится развитию использования возобновляемых источников энергии и энергоносителей. Вовлечение в топливно-энергетический баланс возобновляемых источников энергии по-

зволит сбалансировать энергетический спрос и снизить экологическую нагрузку со стороны предприятий энергетики на окружающую среду [1].

По существующим оценкам, технический ресурс возобновляемых источников энергии, преобладающую долю в котором имеет потенциал использования энер-

гии солнца и ветра, составляет не менее 4,5 млрд т условного топлива в год, что более чем в 4 раза превышает объем потребления всех топливно-энергетических ресурсов России [1].

Экономический потенциал солнечной энергии в России составляет порядка 2,5 млн т условного топлива [2]. Естественной сферой применения солнечных установок являются зоны децентрализованного тепло- и электроснабжения [2], площадь которых оценивается в 60 % территории страны.

При разработке проектов использования солнечной энергии большое внимание необходимо уделять точности оценки прихода суммарной солнечной радиации. К настоящему времени разработаны многочисленные модели оценки прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации, поступающей на наклонные приемные поверхности [3–16]. Большое влияние на поступающую радиацию оказывает облачность [3; 4; 17]. В исследованиях, как правило, используются справочные данные об облачности, оценка которой проводилась в период с 1936 по 1980 гг. [18]. К настоящему времени многолетние статистически необработанные данные о погоде в населенных пунктах могут быть получены на интернет-ресурсах, таких как *rp5.ru*, *pogodaiklimat.ru*, *en.tutitempo.net*. Использование данных о погоде последних лет позволяет учесть климатические изменения, произошедшие за последние десятилетия, а также совершенствование средств измерения.

Предлагается методика оценки суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных.

Методика оценки суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность. Суммарная солнечная радиация, поступающая на наклонную плоскость, включает три составляющие:

$$Q_{\text{накл}} = S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{накл}}$ — суммарная солнечная радиация, падающая на наклонную поверхность, Bm/M^2 ; $S_{\text{накл}}$ — прямое солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность, Bm/M^2 ; $D_{\text{накл}}$ — рассеянное солнечное излучение, поступающее на наклонную поверхность, Bm/M^2 ; $R_{\text{накл}}$ — отраженная от земной поверхности радиация, Bm/M^2 .

Рассмотрим методику расчета прямой солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность.

Значение $S_{\text{накл}}$ определяется в соответствии с выражением:

$$S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cos \theta, \quad (2)$$

где $S_{\text{орт}}$ — прямое солнечное излучение на ортогональную лучам плоскость, Bm/M^2 ; θ — угол падения прямого солнечного излучения на поверхность, rad .

Значение $S_{\text{орт}}$ определяется по формуле Кастрова [3]:

$$S_{\text{орт}} = \frac{S_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c}, \quad (3)$$

где S_0 — солнечная радиация у верхней границы земной атмосферы, Bm/M^2 ; α — высота Солнца, rad ; c — величина, характеризующая степень прозрачности атмосферы:

$$S_0 = S_{0*} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360}{365} d \right) \right), \quad (4)$$

где S_{0*} — солнечная постоянная, равная $1380 Bm/M^2$; d — порядковый номер дня года, отсчитываемый с 1 января.

Высота солнца определяется известной формулой [3]:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega, \quad (5)$$

где ϕ — широта местности, rad ; δ — угол склонения солнца, rad ; ω — часовой угол солнца, rad .

Угол склонения солнца может быть найден по формуле:

$$\delta = \delta_0 \sin \left(360 \frac{284 + d}{365} \right), \quad (6)$$

где δ_0 — максимальное склонение, равное $23,45^\circ$.

Часовой угол солнца определяется:

$$\omega = 15(t - t_{\text{полд}}) + E(t) + (\psi - \psi_{\text{зоны}}), \quad (7)$$

где t — рассматриваемый момент времени, ч; $t_{\text{полд}}$ — местное время солнечного полдня в той часовой зоне, в которую попадает приемная площадка, ч; $E(t)$ — уравнение времени; ψ — географическая долгота площадки, rad ; $\psi_{\text{зоны}}$ — географическая долгота той меридиональной плоскости, в которой полдень совпадает с истинным солнечным полднем, rad .

Уравнение времени:

$$E(t) = 7,53 \cos(B) + 1,5 \sin(B) - 9,87 \sin(2B), \quad (8)$$

$$B = 360 \frac{d - 81}{365}. \quad (9)$$

Поскольку восход Солнца во времени суток на произвольно ориентированной приемной площадке не может произойти раньше, чем для горизонтальной приемной площадки, из-за ограничения прямой видимости по горизонту, то часовые углы восхода и захода необходимо определить по формулам:

$$\omega_{\text{в}}^{\beta\gamma} = \max \left[\omega_{\text{в}}^{\text{г}} \cup 2 \arctg \left(\frac{-C + \sqrt{C^2 - A^2 + B^2}}{A - B} \right) \right], \quad (10)$$

$$\omega_{\text{з}}^{\beta\gamma} = \min \left[\omega_{\text{з}}^{\text{г}} \cup 2 \arctg \left(\frac{-C + \sqrt{C^2 - A^2 + B^2}}{A - B} \right) \right], \quad (11)$$

где:

$$A = (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta, \quad (12)$$

$$B = (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta, \quad (13)$$

$$C = \sin \beta \sin \gamma \cos \delta, \quad (14)$$

где β — угол наклона приемной площадки, rad ; γ — азимут приемной площадки, rad .

Угол падения прямого солнечного излучения на поверхность θ в выражении (2) может быть определен с помощью [6]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega +, \quad (15) \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

Рассмотрим методику расчета рассеянной солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность. Могут использоваться изотропная [4] или анизотропные модели [13–16]. Применение изотропной модели может привести к значительным отклонениям оценок от действительных [4, 13–16].

Анизотропная модель Дж. Хейя может быть представлена следующими формулами [13–16]:

$$D_{\text{накл}} = D_{\text{гор}} \left[F_{\text{Hay}} \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + (1 - F_{\text{Hay}}) \cos^2 \frac{\beta}{2} \right], \quad (16)$$

$$F_{\text{Hay}} = \frac{Q_{\text{гор}} - D_{\text{гор}}}{S_{0\text{гор}}}, \quad (17)$$

где $S_{0\text{гор}}$ — внеатмосферная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, Bm/m^2 ; $D_{\text{гор}}$ — поток рассеянной солнечной энергии на горизонтальную поверхность, Bm/m^2 ; $Q_{\text{гор}}$ — поток суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, Bm/m^2 .

Параметр $D_{\text{гор}}$ можно определить по формуле Берлага [3]:

$$D_{\text{гор}} = \frac{1}{3} (S_0 - S_{\text{орт}}) \cdot \sin \alpha, \quad (18)$$

Суммарная радиация на горизонтальную поверхность $Q_{\text{гор}}$ можно определить по формуле:

$$Q_{\text{гор}} = S_{\text{гор}} + D_{\text{гор}}, \quad (19)$$

где $S_{\text{гор}}$ — прямая радиация на горизонтальную поверхность, Bm/m^2 :

$$S_{\text{гор}} = S_{\text{орт}} \sin \alpha \quad (20)$$

Внеатмосферная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, определяется [16]:

$$\begin{aligned} S_{0\text{гор}} = & \frac{12 \cdot 3,6}{\pi} S_0 (\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \\ & + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta) \end{aligned}, \quad (21)$$

где ω_1, ω_2 — часовые углы Солнца в начале и конце временного интервала.

Анизотропная модель Кларера может быть представлена следующими формулами [14–16]:

$$D_{\text{накл}} = D_{\text{гор}} \cos^2 \frac{\beta}{2} \left(1 + F \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \left(1 + F \cos^2 \theta \cdot \sin^3 \theta_z \right), \quad (22)$$

где F — модулирующая функция, учитывая покрытие неба облаками; θ_z — зенитный угол Солнца, rad :

$$F = 1 - \left(\frac{D_{\text{гор}}}{Q_{\text{гор}}} \right)^2. \quad (23)$$

Согласно исследованиям [15], модель Дж. Хейя занижает оценку рассеянной радиации на наклонную поверхность, но не более 7 %; модель Кларера дает завышенные оценки летом и заниженные — весной, но

не более 5 % для приемных поверхностей наклоном до 60°. Для площадок с большим уклоном погрешность моделей возрастает.

Рассмотрим модель оценки отраженной радиации, поступающей на наклонную поверхность. Для расчета отраженной радиации в большинстве исследований используют изотропную модель [13, 14]:

$$R_{\text{накл}} = \frac{Q_{\text{гор}} A_k (1 - \cos \beta)}{2}, \quad (24)$$

где A_k — альbedo земной поверхности, о.е.

Учет влияния облачности на поступающую суммарную радиацию на наклонную поверхность с использованием данных метеостанций. Можно выделить два подхода к учету влияния облачности на радиацию, поступающую на наклонную поверхность. Первый из них основан на учете общей облачности, второй — на учете визуальных оценок облачности [3].

Влияние общей облачности на суммарную радиацию можно оценить по формуле Т.Г. Берлянд [3; 17]:

$$Q_{\text{накл.обл}} = (S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}) (1 - (a + bn)n), \quad (25)$$

где a — коэффициент, зависящий от среды и от широты местности; b — коэффициент, который можно считать постоянным и равным 0,38; n — общая облачность в долях единицы.

Формула (25) дает удовлетворительно точные результаты при вычислении по ней многолетних средних для данного месяца суточных сумм радиации. Среднее отклонение вычисленных сумм от измеренных составляет 8–10 % без учета знака отклонения и около 3 % с учетом знака [3]. Таким образом, метод расчета по общей облачности можно считать вполне применимым для определения средних месячных характеристик радиационного климата [3].

Оценки суммарной радиации, выполненные с учетом только общей облачности, как правило, оказываются заниженными, так как наличие на солнечном диске облаков, вообще говоря, не означает прекращения притока прямой радиации [3]. Повысить точность оценки позволяет учет нижней облачности, регистрация которой проводится на метеостанциях СССР и России с 1929 г.

В соответствии с методикой П.П. Кузьмина [3; 19]:

$$Q_{\text{накл.обл}} = Q_{\text{накл}} (1 - A \cdot l - B \cdot (n - l)), \quad (26)$$

где A, B — эмпирические коэффициенты, характеризующие ослабление суммарной радиации облачностью нижнего и нижнего со средним ярусов; l — нижняя облачность, выраженная в долях единицы.

Согласно исследованиям, для умеренных широт России $A = 0,65, B = 0,33$; для арктических широт: $A = 0,62, B = 0,24$ [19]. Использование формулы (26) для умеренных широт позволяет получить оценки с погрешностью до 10 % для умеренных широт и до 15 % для арктических широт. В целом учет нижней облачности улучшает оценки суммарной радиации [19].

Для оценки общей и нижней облачности предлагается использовать данные, предоставляемые интернет-ресурсами. Например, на *rp5.ru* представлены сведения

об измерениях, проводимых в среднем 8 раз в сутки за период с 2005 г. Имеется возможность экспорта данных в формате Excel. Промежуточные между измерениями оценки общей и нижней облачности в исследовании вычислялись линейной интерполяцией.

Оценка суммарной радиации на наклонную поверхность в селе Оленёк (Республика Саха (Якутия)). Село Оленёк — административный центр Оленёкского улуса, имеет численность 2 144 чел. по данным 2017 г. Оленёкский улус расположен в зоне децентрализованного электроснабжения — потребители получают питание от дизельных электростанций. Доставка дизельного топлива в арктические улусы является сложным многозвенным процессом, в связи с чем себестоимость электроэнергии может достигать нескольких десятков рублей [20]. Использование солнечной энергии снизит потребление дизельного топлива, повысит экономическую эффективность и надежность электроснабжения потребителей [21–24].

В соответствии с формулами (18) – (20) на первом этапе была определена солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность (табл. 1).

На втором этапе производился расчет солнечной радиации, поступающей на наклонную под углом широты местности поверхность по формулам (1), (2), (16), (22), (24). Результаты представлены в табл. 2, 3.

На третьем этапе с помощью программы Sun-MCA, разработанной автором, были обработаны данные архивов погоды за 2005–2016 гг. Результаты представлены в табл. 4, 5.

С использованием (25), (26) проведена оценка суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность, с учетом облачности (табл. 6, 7).

Таблица 1

Поступающая на горизонтальную поверхность прямая, рассеянная и суммарная радиация

Период	Прямая радиация $S_{гор}$, Вт · ч/м ²	Рассеянная радиация $D_{гор}$, Вт · ч/м ²	Суммарная радиация $Q_{гор}$, Вт · ч/м ²
Январь	224,86	583,58	808,44
Февраль	8 272,16	6 324,04	14 596,19
Март	4 5276,09	19 173,12	64 449,21
Апрель	111 194,50	29 769,64	140 964,14
Май	179 168,63	42 680,19	221 848,82
Июнь	218 450,43	43 992,60	262 443,03
Июль	202 039,43	44 040,56	246 079,99
Август	140 164,94	34 433,01	174 597,95
Сентябрь	68 291,35	21 398,41	89 689,75
Октябрь	17 060,93	10 939,09	28 000,02
Ноябрь	894,19	1 651,72	2 545,91
Декабрь	0,00	0,00	0,00
Год	991 037,50	254 985,96	1 246 023,45

Таблица 2

Поступающая на наклонную поверхность прямая и рассеянная радиация

Период	Прямая радиация $S_{накл}$, Вт · ч/м ²	Рассеянная радиация	
		Модель Хея $D_{накл}$, Вт · ч/м ²	Модель Кларера $D_{накл}$, Вт · ч/м ²
Январь	5 720,69	2 117,59	598,88
Февраль	58 999,49	16 963,08	7 859,89
Март	136 781,39	32 670,93	22 907,56
Апрель	179 852,98	34 107,25	31 355,73
Май	191 573,37	36 120,80	40 280,08
Июнь	193 273,39	32 488,44	39 639,53
Июль	195 373,60	34 735,97	40 522,15
Август	190 261,02	34 763,93	34 643,64
Сентябрь	161 290,24	32 457,10	24 626,51
Октябрь	86 109,18	24 038,55	13 537,62
Ноябрь	14 014,77	5 042,62	1 806,58
Декабрь	0,00	0,00	0,00
Год	1 413 250,12	285 506,24	257 778,16

Таблица 3

Поступающая на наклонную поверхность отраженная и суммарная радиация

Период	Отраженная радиация $R_{накл}$, Вт · ч/м ²	Суммарная радиация	
		Модель Хея $Q_{накл}$, Вт · ч/м ²	Модель Кларера $Q_{накл}$, Вт · ч/м ²
Январь	204,86	8 043,13	6 524,43
Февраль	3 698,67	79 661,24	70 558,05
Март	16 331,40	185 783,72	176 020,34
Апрель	34 827,24	248 787,47	246 035,95
Май	40 756,58	268 450,75	272 610,03
Июнь	18 288,31	244 050,13	251 201,22
Июль	17 148,05	247 257,62	253 043,80
Август	12 719,87	237 744,82	237 624,53
Сентябрь	9 375,03	203 122,36	195 291,77
Октябрь	6 208,29	116 356,02	105 855,09
Ноябрь	620,94	19 678,33	16 442,29
Декабрь	0,00	0,00	0,00
Год	160 179,23	1 858 935,59	1 831 207,51

Поступление солнечной радиации в декабре отсутствует в связи с периодом полярной ночи в селе Оленёк. Летом наблюдается полярный день.

Анализ табл. 2 показывает, что оценки рассеянной радиации, полученные с помощью модели Дж. Хея, имеют большее значение в зимние, весенние и осенние месяцы по сравнению с оценками, полученными с использованием модели Кларера. В летние месяцы мо-

дель Дж. Хейя, напротив, дает меньшие оценки по сравнению с оценками модели Кларера.

При оценке отраженной от поверхности земли радиации (табл. 3) используются данные об альbedo подстилающей поверхности. В арктических регионах в весенние месяцы альbedo имеет достаточно высокие

значения благодаря более долгому сохранению снежного покрова по сравнению с регионами умеренных широт.

Анализ табл. 4, 5 показывает, что район села Оленёк отличается высокой облачностью, особенно увеличивающейся в летний и осенний периоды.

Таблица 4

Общая облачность по данным архивов метеостанции за 2005–2016 гг.

Месяц	2005г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя
Январь	-	8,89	8,19	8,21	7,29	6,80	7,40	4,84	4,08	6,27	4,30	4,39	6,42
Февраль	6,43	7,17	6,19	7,40	5,76	7,44	6,16	6,19	5,25	5,58	4,97	4,94	6,12
Март	7,74	5,98	6,68	8,15	7,19	5,16	7,67	5,91	4,61	6,61	4,75	3,46	6,16
Апрель	8,07	6,83	6,34	7,42	7,33	5,37	6,49	5,94	5,51	7,72	3,41	3,11	6,13
Май	8,15	8,38	8,15	7,99	5,58	7,61	6,13	7,84	6,08	6,82	2,30	3,57	6,55
Июнь	8,25	8,49	8,62	8,14	7,60	8,38	8,36	7,34	5,19	7,60	2,69	2,71	6,95
Июль	8,53	7,92	8,35	9,36	6,78	8,29	7,00	7,39	5,17	6,89	3,21	3,22	6,84
Август	9,48	8,99	8,87	9,22	7,75	8,58	7,63	8,76	8,87	7,46	4,74	3,90	7,85
Сентябрь	8,99	9,32	8,84	8,01	7,82	8,78	8,99	6,37	9,01	8,07	5,20	4,03	7,79
Октябрь	9,13	8,85	9,41	9,05	8,14	8,72	9,18	7,86	7,98	8,94	5,65	6,03	8,25
Ноябрь	7,65	8,11	8,68	6,24	7,96	7,93	6,46	6,89	8,45	6,33	5,33	6,14	7,18
Декабрь	-	8,89	8,19	8,21	7,29	6,80	7,40	4,84	4,08	6,27	4,30	4,39	6,42

Таблица 5

Нижняя облачность по данным архивов метеостанции за 2005–2016 гг.

Месяц	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя
Январь	-	3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,09	0,81	0,39
Февраль	0,10	0,02	0,00	0,02	0,01	0,57	0,03	1,06	0,09	0,00	0,29	0,85	0,25
Март	0,20	0,21	0,21	0,38	0,22	0,29	1,07	0,36	0,09	0,87	0,74	0,35	0,42
Апрель	2,19	0,03	2,40	1,51	1,34	1,49	2,87	1,73	0,87	3,06	1,26	0,59	1,61
Май	4,20	4,49	4,01	4,26	2,52	3,78	2,18	4,13	3,03	2,72	1,12	1,71	3,18
Июнь	3,86	4,61	5,06	3,48	4,00	4,70	5,04	3,53	2,73	4,69	1,30	0,85	3,65
Июль	4,14	3,34	5,30	6,30	3,31	3,75	3,32	2,30	3,02	3,91	1,83	1,15	3,47
Август	6,47	4,86	5,91	5,99	3,36	4,82	3,63	4,15	4,61	4,85	3,09	2,09	4,49
Сентябрь	5,52	5,07	6,42	4,04	4,19	5,83	5,62	3,46	6,15	5,20	2,10	1,70	4,61
Октябрь	5,10	2,57	4,15	4,36	4,18	4,37	4,26	3,10	2,72	4,18	2,12	3,18	3,69
Ноябрь	0,99	0,67	0,53	0,36	1,09	1,84	0,54	0,24	1,70	0,85	1,84	3,20	1,15
Декабрь	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 6

Суммарная солнечная радиация, поступающая на наклонную поверхность, полученная с использованием модели Дж. Хейя и Кларера, с учетом общей облачности

Период	Суммарная радиация	
	Модель Хейя	Модель Кларера
	$Q_{\text{накл}}, \text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$	$Q_{\text{накл}}, \text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$
Январь	5712,47	4633,84
Февраль	58205,13	51553,81
Март	135320,45	128209,04
Апрель	181711,74	179702,06
Май	188266,90	191183,84
Июнь	164201,16	169012,54
Июль	168225,55	172162,27
Август	143353,96	143281,43
Сентябрь	123599,64	118834,74
Октябрь	66431,60	60436,26
Ноябрь	12898,14	10777,08
Декабрь	0,00	0,00
Год	1247926,74	1229786,91

Таблица 7

Суммарная солнечная радиация, поступающая на наклонную поверхность, полученная с использованием модели Дж. Хейя и Кларера, с учетом общей и нижней облачности

Период	Суммарная радиация	
	Модель Хейя	Модель Кларера
	$Q_{\text{накл}}, \text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$	$Q_{\text{накл}}, \text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$
Январь	6684,10	5422,01
Февраль	67182,48	59505,28
Март	155380,85	147215,22
Апрель	196955,99	194777,71
Май	193802,55	196805,26
Июнь	169465,83	174431,47
Июль	174017,04	178089,29
Август	152399,96	152322,85
Сентябрь	129590,82	124594,95
Октябрь	77009,64	70059,65
Ноябрь	15423,80	12887,41
Декабрь	0,00	0,00
Год	1337913,07	1316111,11

Заключение

Полученные по результатам расчетов оценки солнечной радиации, поступающей на наклонную под углом широты местности поверхность, позволяют перейти к оценке экономической эффективности проектов использования солнечной энергии в селе Оленёк. Результаты учитывают как прямую, так и рассеянную, отраженную солнечную радиацию. Использование анизотропных моделей рассеянной радиации позволяет повысить точность оценки суммарной солнечной радиации. Оценка облачности выполнена с учетом не только общей, но и нижней облачности по данным архивов метеостанций за последние 12 лет. Представленная методика реализована в виде программы для ЭВМ Sun-MCA, что позволяет выполнять солнечные энергетические расчеты с учетом вышеизложенных факторов для любых районов России.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. М.: ГУ ИЭС, 2010. 184 с.
2. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / под ред. П.П. Безруких. М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
3. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 234 с.
4. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 170 с.
5. Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., Menicucci D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces // *Solar Energy*. 1987. Vol. 39. P. 221–231.
6. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. – 2nd Edition, Wiley Interscience, New York, 1991. 919 p.
7. Kamali Gh. A., Moradi I., Khalili A. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran) // *Theoretical and Applied Climatology*. 2006. Vol. 84. P. 235–241.
8. Loutzenhiser P.G., Manz H., Felsmann C., Strachan P.A., Frank T., Maxwell G.M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation // *Solar Energy*. Vol. 81. 2007. P. 254–267.
9. Pandey C.K., Katiyar A.K. A note on diffuse solar radiation on a tilted surface // *Energy*. 2009. Vol. 34. P. 1764–1769.
10. Al-Rawahi N.Z., Zurigat Y.H. Al-Azri N.A. Prediction of Hourly Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces for Muscat/Oman // *The Journal of Engineering Research*. 2011. Vol. 8, № 2. P. 19-31.
11. Chandell S.S., Aggarwal R.K. Estimation of Hourly Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces in Western Himalayas // *Smart Grid and Renewable Energy*. 2011. Vol. 2. P. 45-55.
12. Souza A.P., Escobedo J.F. Estimates of Hourly Diffuse Radiation on Tilted Surfaces in Southeast of Brazil // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 207-221.
13. Стадник В.В., Разгоняев Ю.В. Оценка суммарного прихода солнечной радиации, поступающей на наклонные

поверхности // *Тр. Гл. геофизич. обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2008. № 557. С. 67-84.

14. Стадник В.В., Еорбаренко Е.В., Шиловцева О.А., Задворных В.А. Сравнение вычисленных и измеренных величин суммарной и рассеянной радиации, поступающей на наклонные поверхности, по данным наблюдений в метеорологической обсерватории МГУ // *Тр. Гл. геофизич. обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2016. № 581. С. 138-154.

15. Ma C.C.Y., Iqbal M. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces // *Solar Energy*. 1983. Vol. 31, № 3. P. 313-317.

16. Maleki S.A.M., Hizam H., Gomes C. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited // *Energies* 2017. Vol. 10. № 1, P. 134-162.

17. Берлянд Т.Г. Методика климатологических расчетов суммарной радиации // *Метеорология и гидрология*. 1960. № 6. С. 9-12.

18. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 24. Якутская АССР. Л.: Гидрометеоздат, 1989. Кн. 1. 607 с.

19. Гальперин Б.М., Ченцова Т.А. О расчетах месячных сумм солнечной радиации по общей и нижней облачности // *Труды ЛГМИ*. 1972. Вып. 48. С. 119-124.

20. Дарбасов В.Р., Торговкина О.В. О комплексном развитии сельских территорий республики Саха (Якутия) // *Экономический анализ: теория и практика*. 2013. № 31 (334). С. 28-32.

21. Шарипова А.Р., Киушкина В.Р. Оценка основных производственных фондов малой энергетики северного энергорайона республики Саха (Якутия) // *Промышленная энергетика*. 2013. № 9. С. 11-13.

22. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Возобновляемая энергетика на востоке России // *Академия энергетики*. 2014. № 4 (60). С. 28-33.

23. Иванова И.Ю. Возобновляемая энергетика на востоке России: прогнозы, барьеры, методы обоснования применения // *Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XVIII Байкальской Всерос. конф. Иркутск*, 2013. С. 96-103.

24. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Петров Н.А. Нетрадиционная энергетика в энергоснабжении изолированных потребителей регионов севера // *Проблемы нетрадиционной энергетики: материалы науч. сессии Президиума Сиб. отд-ния РАН. Новосибирск*, 2006. С. 55-70.

References

1. Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. M.: GU IES, 2010. 184 p.
2. Handbook on renewable energy resources of Russia and local types of fuel (indicators by territories / pod red. P.P. Bezrukikh. M.: IATs Energiya, 2007. 272 p.
3. Sivkov S.I. Methods for solar radiation estimation. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 234 p.
4. Kondrat'ev K.Ya., Pivovarova Z.I., Fedorova M.P. Radiation mode of inclined surfaces. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 170 p.
5. Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., Menicucci D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces // *Solar Energy*. 1987. Vol. 39. P. 221-231.
6. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. - 2nd Edition, Wiley Interscience, New York, 1991. 919 p.
7. Kamali Gh. A., Moradi I., Khalili A. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in

- Karaj (Iran) // *Theoretical and Applied Climatology*. 2006. Vol. 84. P. 235-241.
8. Loutzenhiser P.G., Manz H., Felsmann C., Strachan P.A., Frank T., Maxwell G.M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation // *Solar Energy*. Vol. 81. 2007. P. 254-267.
9. Pandey C.K., Katiyar A.K. A note on diffuse solar radiation on a tilted surface // *Energy*. 2009. Vol. 34. P. 1764-1769.
10. Al-Rawahi N.Z., Zurigat Y.H. Al-Azri N.A. Prediction of Hourly Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces for Muscat/Oman // *The Journal of Engineering Research*. 2011. Vol. 8, № 2. P. 19-31.
11. Chandell S.S., Aggarwal R.K. Estimation of Hourly Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces in Western Himalayas // *Smart Grid and Renewable Energy*. 2011. Vol. 2. P. 45-55.
12. Souza A.P., Escobedo J.F. Estimates of Hourly Diffuse Radiation on Tilted Surfaces in Southeast of Brazil // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 207-221.
13. Stadnik V.V., Razgonyaev Yu.V. Estimation of global solar radiation on inclined surfaces // *Tr. Gl. geofizich. observatorii im. A.I. Voeikova*. 2008. № 557. P. 67-84.
14. Stadnik V.V., Eorbarenko E.V., Shilovtseva O.A., Zad-vornyykh V.A. Comparison of the calculated and measured values of the global and diffuse radiation on inclined surfaces, according to observations at the meteorological observatory of the Moscow State University // *Tr. Gl. geofizich. observatorii im. A.I. Voeikova*. 2016. № 581. P. 138-154.
15. Ma C.C.Y., Iqbal M. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces // *Solar Energy*. 1983. Vol. 31, № 3. P. 313-317.
16. Maleki S.A.M., Hizam H., Gomes C. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited // *Energies* 2017. Vol. 10. № 1, P. 134-162.
17. Berlyand T.G. Method of climatological estimation of global radiation // *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1960. № 6. P. 9-12.
18. Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Vyp. 24. Yakutskaya ASSR. L.: Gidrometeoizdat, 1989. Kn. 1. 607 p.
19. Gal'perin B.M., Chentsova T.A. Calculations of monthly sums of solar radiation in general and low-level cloud cover // *Trudy LGMI*. 1972. Vyp. 48. P. 119-124.
20. Darbasov V.R., Torgovkina O.V. On the integrated development of rural areas of the Sakha Republic (Yakutia) // *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2013. № 31 (334). P. 28-32.
21. Sharipova A.R., Kiushkina V.R. Estimation of the fixed business assets of small-scale power in the northern energy district of the Republic of Sakha (Yakutia) // *Industrial Power Engineering*. 2013. № 9. P. 11-13.
22. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F. Renewable energy in the east of Russia // *Akademiya energetiki*. 2014. № 4 (60). P. 28-33.
23. Ivanova I.Yu. Renewable energy in Russia's east: forecasts, barriers, feasibility study methods // *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: tr. XVIII Baik-al'skoi Vseros. konf. Irkutsk*, 2013. P. 96-103.
24. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Petrov N.A. Non-conventional power energy in the power supply of isolated consumers in the regions of the north // *Problemy netraditsionnoi energetiki: materialy nauch. sessii Prezidiuma Sib. otd-niya RAN. Novosibirsk*, 2006. P. 55-70.