

Математическое моделирование солнечной радиации с учетом динамики в средних и нижних слоях атмосферы

Дмитрий Карамов¹, Евгений Юмашев¹

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

Аннотация

В статье представлена универсальная методика моделирования солнечной радиации на рассматриваемой территории с учетом динамики процессов, происходящих в средних и нижних слоях атмосферы. За основу была взята модель для условий ясного неба - Iqbal (1980) с последующей компиляцией с моделью учета облачности F. Kasten - G. Czeplak (1980). Показаны основные алгоритмы расчета, ключевые параметры и их связь с актинометрическими показателями.

В настоящий момент команда ИДСТУ СО РАН разрабатывает открытый WPS-сервис, позволяющий автоматически рассчитывать солнечную радиацию на рассматриваемой территории на основании ретроспективных данных формата FM 12 Synop.

Ключевые слова

Солнечная радиация, актинометрические показатели, WPS-сервис, Python, FM 12 Synop, METAR

1. Введение

Описание ключевых метеорологических параметров является первым шагом при использовании возобновляемых источников энергии. Метеорологические параметры позволяют качественно оценить потенциал того или иного возобновляемого энергоресурса, например, падающая на м^2 за год солнечная радиация, средняя за рассматриваемый промежуток времени скорость ветра с учетом повторяемости.

Метеопараметры могут быть представлены численными значениями и качественной (словесной) оценкой. Например, скорость ветра, давление, влажность, суммарная солнечная радиация, альbedo облаков и Земли, толщина озонового слоя и другие параметры представляются численными значениями. Качественная оценка характеризует отдельные метеоданные такие как состав облаков каждого яруса, наличие облаков плохой погоды, туманов, задымлений и т.д. Зачастую качественная оценка метеоданных связана с описанием ключевых параметров облачности, прозрачности нижних слоев атмосферы.

С позиции практического использования метеоданные могут быть разделены на две группы, а именно непосредственно влияющие на ключевые параметры работы генераторов использующих возобновляемую энергию, а также косвенные влияние которых учитывается через отдельные параметры и факторы.

Потенциал возобновляемых источников энергии характеризуется количеством суммарной солнечной радиации ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$) и средней скоростью ветра за рассматриваемый период (месяц, год) в $\text{м}/\text{с}$. Солнечная радиация и скорость ветра необходимы для определения потенциально возможной генерации, моделирования отдельных режимных параметров и как результат анализа технической и экономической эффективности применения возобновляемых

6th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia

EMAIL dmitriy.karamov@mail.ru (A. 1); yumashevgeny@mail.ru (A. 2)

ORCID: 0000-0001-5360-4826 (A. 1); 0009-0003-8736-0155 (A. 2)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2024 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.17

источников энергии. Анализ упомянутых показателей можно выполнять различными способами.

2. Обзор математических моделей солнечной радиации

В данном разделе статьи представлены наиболее распространённые подходы к определению актинометрического потенциала на рассматриваемой территории.

Последовательность развития наиболее значимых зарубежных эмпирических моделей солнечной радиации имеет следующий вид: *P.I. Cooper* (1969), *R.E. Schulze* (1976), *M.A. Atwater* (1978), *M. Iqbal* (1980), *R.E. Bird* (1981), *G.L. Powel* (1984), *ASHRAE* (1985), *C. Gueymard* (1993) и многих других [1-10]. Представленные математические модели позволяют определять актинометрические показатели для условий ясного неба. В зарубежной литературе такие модели получили название *clear sky solar radiation model*.

Советская школа моделирования солнечной радиации начинается с работ: *С.И. Савинова* (1925), *В.Г. Кастрова* (1935), *В.Н. Украинцева* (1938), *Н.М. Копылова* (1949), *Т.Г. Берлянд* (1955), *С.И. Сивкова* (1968), *К.Я. Кондратьева* (1975) и других исследователей [11-17]. Дальнейшее совершенствование советской школы моделирования солнечной радиации получило развитие в работах современников. В настоящее время можно выделить следующих ученых активно развивающих данное направление, а именно: *А.А. Николаева*, *Б.В. Лукутина*, *С.Г. Обухова*, *В.А. Шакирова*, *А.Г. Васькова*, *В.А. Шкляева*, *А.А. Акулинина*, *И.А. Плотникова*, *Н.А. Халгаеву*, *Л.Г. Муста* и многих других [18-26].

Важным этапом при моделировании суммарной радиации является учет динамики облачности на рассматриваемой локации. Ранее отмечалось, что облачность может быть задана количеством солнечных и пасмурных дней по месяцам года либо реальными многолетними массивами фактической облачности. В частности, общая облачность в процентах, состав облаков, наличие облаков плохой погоды, а также высота их образования. Данные показатели выступают в качестве исходной информации для определения коэффициентов ослабления солнечной радиации. Наиболее известными эмпирическими моделями учета облачности являются: *B. Haurwitz* (1948), *S.B. Idso* (1969) *M.A. Atwater* (1974), *J.A. Davies* (1975), *J.E. Hay* (1977), *F. Kasten - G. Czeplak* (1980) и другие [27-36].

Следует отметить, что возможны различные сочетания представленных математических моделей солнечной радиации для условий ясного неба и учета фактической облачности. Эти сочетания в первую очередь зависят от объема данных метеорологических наблюдений, а также уровня их детализации [37].

Подробный литературный обзор, сопоставление и анализ эмпирических математических моделей солнечной радиации с учетом облачности представлены в работах: *В.А. Шакирова*, *L.T. Wong*, *A.E. Gürel* [38-40].

3. Методика расчета солнечной радиации

Поступающая на поверхность Земли солнечная радиация непостоянна и зависит от множества неизменяющихся и переменных параметров.

К неизменяющимся из года в год параметрам относятся: географические координаты и часовой пояс местности, количество дней расчетного периода, время восхода, зенита и заката Солнца, продолжительность дня и т. д.

К переменным параметрам в первую очередь необходимо отнести следующие показатели: наличие облачности, состав облаков, альbedo облаков и альbedo поверхности Земли, атмосферная масса с учетом изменяющегося давления и температуры воздуха, изменение толщины вертикального столба озонового слоя, изменение спектрального состава области видимого света, наличие в облаках водяного пара, аэрозолей и т. д.

4. Определение продолжительности дневного солнечного сияния в течение года

При расчете солнечной радиации в первую очередь для каждого дня определяется время восхода, зенита и заката Солнца на рассматриваемой территории.

Номер дня

$$n = n_1 - (n_2 \cdot n_3) + N_d - 30, \quad (1)$$

$$n_1 = (275 \cdot N_m / 9), \quad (2)$$

$$n_2 = (N_m + 9) / 12, \quad (2.5)$$

$$n_3 = 1 + \left((N_y - 4 \times (N_y / 4) + 2) / 3 \right), \quad (3)$$

где N_d – номер дня в году, N_m – номер месяца, N_y – номер расчетного года.

Средняя аномалия Солнца

$$M_s = (0,9856 \cdot t_i) - 3,289, \quad (4)$$

если восход

$$t_i = n + \left((6 - (\text{lon}/15)) / 24 \right), \quad (5)$$

если закат

$$t_i = n + \left((18 - (\text{lon} / 15)) / 24 \right), \quad (6)$$

Истинная долгота Солнца

$$L_s = M_s + (1,916 \cdot \sin(M_s)) + (0,020 \cdot \sin(2 \cdot M_s)) + 282,634, \quad (7)$$

Прямое восхождение Солнца

$$R_s = \left(\tan^{-1} (0,91764 \times \tan(L_s)) + 360 \right) / 15, \quad (8)$$

Склонение Солнца

$$\sin dec = 0,39782 \cdot \sin(L_s), \quad (9)$$

$$\cos dec = \cos(\sin^{-1}(\sin dec)), \quad (10)$$

Местный часовой угол Солнца

$$\cos H_s = \left(\cos - \left(\frac{\sin dec \cdot \sin(lat)}{\cos dec \cdot \cos(lat)} \right) \right), \quad (11)$$

$$H_s = (360 - \cos^{-1}(\cos(H))) / 15. \quad (12)$$

Местное время восхода и захода Солнца

$$T_s = H_s + R_s - (0,06571 \cdot t_i) - 6,622. \quad (13)$$

Перевод полученных значений на долготу местности

$$U_t = T_s - (lon / 15). \quad (14)$$

Определение времени восхода и захода Солнца на рассматриваемой территории

$$L_t = U_t + UTC \pm 24. \quad (15)$$

В качестве примера на рисунке 1 показаны временные характеристики восхода и захода Солнца в течение года для различных локаций, расположенных на территории Южного федерального округа, восточной Сибири и Дальнего Востока России.

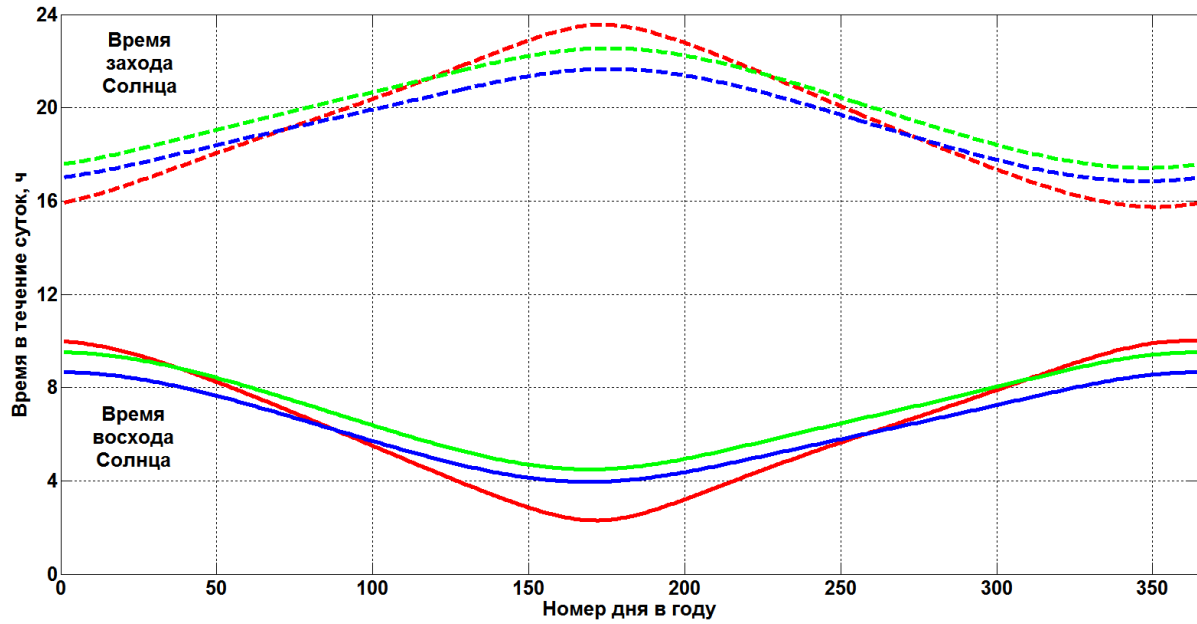


Рисунок 1: Время восхода и захода Солнца в течение года

Результаты, полученные при использовании WPS-сервиса, имеют характерный вид для рассматриваемого региона с максимальными значениями в весенне-летний периоды.

5. Математическое моделирование солнечной радиации с учетом динамики масс в нижних и средних слоях атмосферы

После того как определены временные интервалы, в рамках которых местный часовой угол Солнца больше нуля, а именно $H_s(t) > 0$, то производится расчет прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории. В работе используются основные положения, представленные в математической модели автора *M. Iqbal* 1980 года [41, 42].

$$\dot{I}_n(t) = 0,9751 \cdot E_0(t) \cdot \dot{I}_{sc}(t) \cdot \tau_r(t) \cdot \tau_o(t) \cdot \tau_g(t) \cdot \tau_w(t) \cdot \tau_a(t), \quad (16)$$

где E_0 – корреляционный коэффициент эксцентриситета орбиты Земли

$$E_0 = 1,00011 + 0,0034221 + 0,00128 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma, \quad (17)$$

$$\Gamma = 2\pi \cdot ((N_d - 1) / 365), \quad (18)$$

где $\tau_r(t), \tau_o(t), \tau_g(t), \tau_w(t), \tau_a(t)$ являются коэффициентами пропускания света, которые представлены Релеевским рассеиванием, рассеиванием в озоновом слое, наличием газа и капель воды в атмосфере, а также аэрозолями.

$$\tau_r(t) = e^{-0,0903 \times m_a^{0,84}(t) \times (1 + m_a(t) - m_a^{1,01}(t))}, \quad (19)$$

$$\tau_o(t) = 1 - \left[\frac{0,1611 \cdot U_3(t) \cdot (1 + 139,48 \cdot U_3(t))^{-0,3035} -}{-0,002715 \cdot U_3(t) \cdot (1 + 0,044 \cdot U_3(t) + 0,0003 \cdot U_3^2(t))^{-1}} \right], \quad (20)$$

$$\tau_g(t) = e^{-0,0127 \cdot m_a^{0,26}(t)}, \quad (21)$$

$$\tau_w(t) = 1 - 2,4959 \cdot U_1(t) \cdot \left[(1 + 79,034 \cdot U_1(t))^{0,6828} + 6,385 \cdot U_1(t) \right]^{-1}, \quad (22)$$

$$\tau_a(t) = e^{-l_{ao}^{0,873}(t) \cdot (1 + l_{ao}(t) \cdot l_{ao}^{0,7808}(t)) \cdot m_a^{0,9708}(t)}, \quad (23)$$

где $m_a(t)$ – атмосферная масса с учетом поправки на давление окружающей среды

$$m_a(t) = m_z(t) \cdot (p_{air}(t) / 1013,25) \quad (24)$$

где $p_{air}(t)$ (мбар) – местное атмосферное давление и атмосферная масса

$$m_z(t) = 1 / \sin \delta(t). \quad (25)$$

Угол склонения Солнца

$$\delta(t) = \sin^{-1} \left(\sin(23,45) \cdot \sin(360 / 365 \cdot (n_d(t) - 81)) \right). \quad (2.29)$$

Угол возвышения Солнца

$$\alpha(t) = 90 - lat + \delta(t). \quad (26)$$

Оптическая длина пути в озоновом слое атмосферы с учетом поправки на давление окружающей среды (единицы Добсона, (еД))

$$U_3(t) = l_{oz}(t) \cdot m_a(t), \quad (27)$$

где $l_{oz}(t)$ – (еД) вертикальная величина озонового слоя.

Относительная длина оптического пути с учетом наличия капель воды и водяного пара в атмосфере, см

$$U_1(t) = w(t) \cdot m_z(t), \quad (28)$$

где w (см) – осажденная толщина водяного пара и капель воды в атмосфере. $w(t)$ рассчитывается с учетом поправки на температуру и давление окружающей среды w' (см)

$$w(t) = w'(t) \cdot (p_{air}(t) / 1013,25)^{3/4} \cdot (273 / T_{air}(t))^{1/2}. \quad (29)$$

Оптическая глубина аэрозолей

$$I_{ao}(t) = 0,2758 \cdot I_{ao;\lambda|\lambda=0,38\mu m}(t) + 0,35 \cdot I_{ao;\lambda|\lambda=0,5\mu m}(t). \quad (30)$$

AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) позволяет получить многолетние данные по $w'(t)$, $I_{ao;\lambda|\lambda=0,38\mu m}(t)$, $I_{ao;\lambda|\lambda=0,5\mu m}(t)$. Ежегодно метеостанции, обладающие соответствующим оборудованием для измерения данных параметров, передают накопленную информацию в международный центр, где полученные данные хранятся и систематизируются.

Прямая солнечная радиация

$$\dot{I}_b(t) = \sin \alpha(t) \cdot \dot{I}_n(t) \cdot C_{c-dr}(t), \quad (31)$$

где $\sin \alpha$ (градусы) угол возвышения и C_{c-dr} коэффициент уменьшения прямой солнечной радиации за счет облачности. При определении коэффициента ослабления солнечной радиации используется математическая модель авторов *Fritz Kasten* и *Gerhard Czeplak* модификации 1980 года.

$$C_{c-dr}(t) = 1 - 0,75 \cdot (N(t)/8)^{3,4}, \quad (32)$$

где N зависит от степени покрытия неба облаками в определенный момент времени (3 часовой интервал) – измеряется в октантах (oktas) [32].

Рассеянная солнечная радиация образуется в результате рассеивания солнечных лучей в нижних слоях атмосферы и отражённая от земной поверхности земли.

$$\dot{I}_d(t) = (\dot{D}_r(t) + \dot{D}_a(t) + \dot{D}_m(t)), \quad (33)$$

где $\dot{D}_r(t)$ – Релеевское рассеивание солнечной радиации после первого прохождения атмосферы.

$$\dot{D}_r(t) = \frac{0,79 \cdot \dot{I}_{sc}(t) \cdot \sin \alpha(t) \cdot \tau_o(t) \cdot \tau_g(t) \cdot \tau_w(t) \cdot \tau_{aa}(t) \cdot 0,5 \cdot (1 - \tau_r(t))}{1 - m_a(t) + m_a^{1,02}(t)}, \quad (34)$$

$$\tau_{aa}(t) = 1 - (1 - \omega_0) \cdot (1 - m_a(t) + m_a^{1,06}(t)) \cdot (1 - \tau_a(t)). \quad (35)$$

где ω_0 – безразмерная величина, характеризующая альбедо при однократном рассеянии приходящей энергии Солнца через толщу аэрозолей в средних слоях атмосферы, принимается равной 0,9 [[39]].

Аэрозольное рассеивание солнечной радиации при проходе через атмосферу

$$\dot{D}_a(t) = \frac{0,79 \cdot \dot{I}_{sc}(t) \cdot \sin \alpha(t) \cdot \tau_o(t) \cdot \tau_g(t) \cdot \tau_w(t) \cdot \tau_{aa}(t) \cdot 0,84 \cdot (1 - \tau_r(t))}{1 - m_a(t) + m_a^{1,02}(t)} \quad (36)$$

$$\tau_{as}(t) = \tau_a(t) / \tau_{aa}(t). \quad (37)$$

Рассеянная солнечная радиация, многократно отраженная между поверхностью Земли и нижними слоями атмосферы,

$$\dot{D}_m(t) = \frac{(\dot{I}_n(t) \cdot \sin \alpha(t) + \dot{D}_r(t) + \dot{D}_a(t)) \cdot \rho_g(t) \cdot \rho_a(t)}{1 - \rho_g(t) \cdot \rho_a(t)}, \quad (38)$$

Альбедо нижних слоев атмосферы с учетом динамики изменения облачности

$$\rho_a(t) = 0,0685 + (1 - \rho_a^{ct}(t)) \cdot (1 - \tau_{as}(t)), \quad (39)$$

где $\rho_g(t)$ – альбедо земной поверхности, о.е. $\rho_a^{ct}(t)$ – альбедо облаков относительно каждого временного интервала, о.е. Альбедо облаков зависит от их типа и состава. В данной работе

используется следующий алгоритм для определения данного параметра. Для каждого временного интервала формируется массив данных в котором представлен актуальный состав облаков, а также их процентное соотношение.

Суммарная солнечная радиация, Вт/м²

$$\dot{I}_t(t) = \dot{I}_b(t) + \dot{I}_d(t). \quad (40)$$

Таким образом предложенный тандем моделей для расчета суммарной солнечной радиации в зависимости от географического положения местности, фактических значений природно-климатических показателей, динамики облачности, водяного пара и аэрозолей в нижних и средних слоях атмосферы является универсальным и может быть использован для любой локации. В качестве примера на рисунке 2 показана характеристика суммарной солнечной радиации, рассчитанная по вышеописанной методике для населенного пункта «Иннялы» Республика Саха (Якутия) по данным последних 14 лет метеорологических наблюдений.

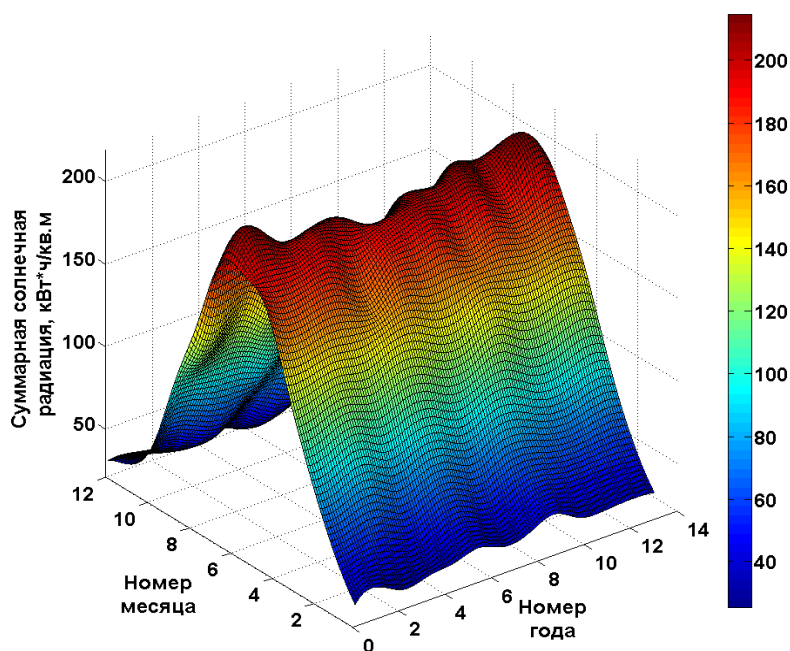


Рисунок 1: Суммарная солнечная радиация для н.п. «Иннялы»

На основании полученной характеристики можно определить следующие годовые показатели: минимальное значение – 1240 кВт·ч/м²; максимальное значение – 1325 кВт·ч/м²; среднее значение – 1285 кВт·ч/м². Если сравнить полученные результаты моделирования с реальными значениями с рассматриваемой локации, то среднегодовая солнечная радиация составляет 1278 кВт·ч/м².

6. Заключение

В статье представлена универсальная методика расчета солнечной радиации на рассматриваемой территории. Методика включает в себя основные метеорологические параметры необходимые для расчета прямой, рассеянной, суммарной солнечных радиаций.

В настоящий момент авторы статьи совместно с коллегами из ИДСТУ СО РАН разрабатывают WPS-сервис, позволяющий реализовать данную методику с возможностью формирования типичного, оптимистичного, пессимистичного метеорологического года. Более того усилия будут направлены на разработку прогнозной модели на основании ретроспективных данных природно-климатических показателей, а также ряда астрономических параметров.

7. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», , рег. № 124052100088-3).

8. Список источников

- [1] Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 1969, vol. 12, pp. 333–346.
- [2] Schulze R.E. A physically based method of estimating solar radiation from suncards. *Agricultural Meteorology*, 1976, vol. 16, pp. 85–101.
- [3] Atwater M.A., Ball J.T. A surface solar radiation model for cloudy atmosphere. *Monthly weather review*, 1980, vol. 109, pp. 878–888.
- [4] Iqbal M. Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface. *Solar energy*, 1980, vol. 24, pp. 491–503.
- [5] Bird R.E., Hulstrom R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *SERI Technical Report*, 1981, vol. 69, pp. 642–761.
- [6] Bird R.E. A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar energy*, 1984, vol. 32, pp. 461–471.
- [7] Powel G.L. Comparative evaluation of SOLMET clear sky global solar radiation model. *Solar energy*, 1984, vol. 32, pp. 453–460.
- [8] Carroll J. J. Global transmissivity and diffuse fraction of solar radiation for clear and cloudy skies as measured and as predicted by bulk transmissivity models. *Solar energy*, 1985, vol. 35, pp. 115–118.
- [9] Barbaro S., Cannistraro G., Giaconia C., Orioli A. The ASHRAE clear sky model. An evaluation in the Mediterranean Zone. *Solar & Wind Technology*, 1984, vol. 5, pp. 111–116.
- [10] Gueymard C. Critical analysis and performance assessment of clear-sky solar-irradiance models using theoretical and measured data. *Solar energy*, 1993, vol. 51, pp. 121–138.
- [11] Савинов С.И. Солнечная земная и атмосферная радиация // Климат и погода. – 1926. – № 2- 3. – С. 12-59.
- [12] Кастров В. Г. К вопросу об основной актинометрической формуле. // Метеорол. Вестник. – 1928. – № 7. – С. 173-175.
- [13] Украинцев В. Н. Приближенное вычисление сумм прямой и рассеянной солнечной радиации // Метеорология и гидрология. – 1939. – № 6. – С. 3-18.
- [14] Копылов Н. М. О приближенных вычислениях сумм солнечной радиации // Тр. ГГО. – 1949. – № 14(76). – С. 63-69.
- [15] Берлянд Т. Г. Методика климатологических расчетов суммарной радиации // Метеорология и гидрология. – 1960. – № 6. – С. 9-12.
- [16] Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1965, 690 с.
- [17] Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометиздат, 1978. 170 с.
- [18] Николаев А.А. Климатические ресурсы солнечной радиации и ветра на территории Среднего Поволжья и возможности их использования в энергетике: дис. канд. геогр. наук. – 2000. – 139 с.
- [19] Николаев А.А. Косвенные методы расчета характеристик солнечной радиации // Вестник Удмуртского университета. – 2013. – № 1. – С 130-135.
- [20] Обухов С.Г., Плотников И.А. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2017. - № 16-18. – С 43-56.

- [21] Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Учет данных метеостанций при анализе эффективности применения солнечных энергетических установок. Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. - № 3. – С 227-232.
- [22] Васьков А.Г., Нарынбаев А.Ф. Обзор и классификация методов оценки и прогнозирования солнечной радиации // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 49-61.
- [23] Исаков С.В., Шкляев В.А. Оценка поступления солнечной радиации на естественные поверхности с применением геоинформационных систем // Географический вестник. 2012. № 1. С. 72-80.
- [24] Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации // Проблемы региональной энергетики. 2008. № 1. С. 29-39.
- [25] Кошелев А.А., Халгаева Н.А. Оценка целесообразности и выбор оптимальных решений для солнечного энергоснабжения в условиях азиатской части России // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2006. № 3. С. 102-109.
- [26] Муста Л.Г. Моделирование потока солнечной радиации на произвольно ориентированную поверхность // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1. С. 110-113.
- [27] Haurwitz, G.: Insolation in Relation to Cloud Type. J. Met.5, 110–113 (1948).
- [28] Idso S. B. Atmospheric attenuation of solar radiation //Journal of Atmospheric Sciences. – 1969. – Т. 26. – №. 5. – С. 1088-1095.
- [29] Atwater M. A., Brown Jr P. S. Numerical computations of the latitudinal variation of solar radiation for an atmosphere of varying opacity //Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1974, vol. 13, pp. 289–297.
- [30] Davies J.A., Schertzer W., Nunez M. Estimating Global Solar Radiation. Boundary-Layer. Meteorology. 1975 vol. 9, pp. 33–52.
- [31] Suckling P.W., Hay J.E. A cloud layer-sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation. Atmosphere. 1977, vol. 15, pp. 194–207.
- [32] Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. Solar Energy, 1980, vol. 75, pp. 177–189.
- [33] Ehnberg J.S.G., Bollen M.H.J. Simulation of global solar radiation based on cloud observations. Solar Energy, 2005, vol. 24, pp. 157–162.
- [34] Hamdan M.A. Gazzawi N. The effect of clouds on solar radiation. Solar Energy, 1993, vol. 34, pp. 29–32.
- [35] Dissing D., Wendler G. Solar Radiation Climatology of Alaska. Theoretical applied climatology, 1998, vol. 61, pp. 161–175.
- [36] Badescu V., Dumitrescu A. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness. Energy Conversion and Management, 2013, vol. 67, pp. 75–91.
- [37] Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 28–38.
- [38] Vladislav Shakirov, Irina Ivanova, Tatyana Tuguzova (2022) Development of empirical solar radiation models with genetic algorithm and extended validation procedure, International Journal of Green Energy,
- [39] Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. Applied Energy, 2001, vol. 69, pp. 191–224.
- [40] Gürel A.E., Ağbulut Ü., Bakır H., Ergün A., Yıldız G. A state of art review on estimation of solar radiation with various models. Heliyon, 2023, vol. 9, e13167.
- [41] Iqbal M. Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. Solar Energy 1978; 20 (1): 101–5.
- [42] Iqbal M. An introduction to solar radiation. Toronto: Academic press, 1983.