

УДК 620.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

Карамов Дмитрий Николаевич,
dmitriy.karamov@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность работы обусловлена значительным ростом ввода объектов генерации, использующих возобновляемые источники энергии на территории Сибири и Дальнего Востока.

Цель работы: продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов, зафиксированных на ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции, и других параметров, взятых из открытых источников для моделирования солнечной радиации; показать эффективность использования математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak* при моделировании суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации для территорий арктической и приарктической зоны Сибири и Дальнего Востока.

Методы исследования. В работе теория выстроена на апробированных математических моделях солнечной радиации *Iqbal* с определением ряда астрономических и динамических процессов, протекающих в средних и нижних слоях атмосферы, с применением математических моделей анализа фактической облачности *Kasten-Czeplak*. Используются массивы многолетних метеонаблюдений, зафиксированные на различных метеостанциях, а также данные из открытых источников. Применяется высокоуровневый язык программирования *Matlab*.

Результаты. Выявлены закономерности при моделировании солнечной радиации в арктической и приарктической зоне Республики Якутия. Проведено математическое моделирование суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации для 12-летнего периода метеонаблюдений с шагом один час для различных населенных пунктов. Получены массивы солнечной радиации размерностью 105120×3 (12 лет). Разработан программно-вычислительный комплекс «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации», реализующий представленную методику. Сделаны соответствующие выводы и заключения о полученных результатах, степени их достоверности и возможном их использовании в дальнейших исследованиях научно-прикладного характера.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, метеорологические ряды, облачность, *Iqbal model*, *Kasten-Czeplak model*.

Введение

Современный вектор энергетической политики мира направлен на увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общемировом энергетическом балансе [1–3]. Ускорившийся переход на безуглеродную энергетику продиктован сложившейся ситуацией на мировом энергетическом рынке сырья [4], а также подписанием исторического «Парижского соглашения» о климате, подразумевающего сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу. «Киотский протокол» и спустя двадцать лет «Парижское соглашение» являются основополагающими механизмами перехода на экологически чистую энергетику во всем мире [5].

Стоит отметить, что во многих регионах вводятся как краткосрочные, так и долгосрочные программы по развитию ВИЭ. В Европейском Союзе действует программа «Еurore 2020», согласно которой к 2020 г. доля ВИЭ в общей генерации будет составлять не менее 20 % [6]. В США разработана программа «Federal Energy Management Program», цель которой состоит в сокращении выбросов CO_2 на 40 % (по сравнению с 2008 г.) [7]. В РФ Министерством энергетики разработана «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», где значимую роль отводят развитию ВИЭ [8]. Как утверждает министр энергетики РФ А.В. Но-

вак, в энергетической стратегии до 2035 года предусматривается рост доли ВИЭ в общем энергетическом балансе страны до уровня 3–4 % [9].

Во многих странах разрабатываются собственные программы, стратегии, планы, законодательные акты по содействию развитию ВИЭ: зеленые сертификаты [10], бесплатное подключение к энергетической системе [11], гарантированная цена и покупка произведенной энергии [12], налоговые льготы и разные другие преференции [13]. Можно с уверенностью сказать, что сложившаяся конъюнктура мировой энергетики имеет все необходимые условия для успешного развития ВИЭ как в централизованных, так и автономных системах электроснабжения.

Интересным фактом является то, что в странах Европейского Союза ВИЭ преимущественно используются в централизованных системах [14], в то время как в России – в автономных [15].

Это продиктовано тем, что в северных и северо-восточных регионах России находится около 250 автономных систем электроснабжения, где в качестве основного генерирующего оборудования используются дизель-генераторы с установленной мощностью от 10 до нескольких сотен кВт [16]. Уравновешенная стоимость электроэнергии (*levelized cost of electricity – LCOE*) для таких систем находится в диапазоне от 0,35 до 0,6€ за кВт·ч,

что является крайне высокими значениями. Такие большие показатели связаны с высокой стоимостью арктического дизельного топлива (с учетом доставки), которая составляет от 816,38 до 1041,98€ за тонну [17].

Российский и мировой опыт показывает, что использование возобновляемых источников энергии совместно с традиционными энергетическими установками и накопителями энергии является экономически эффективным способом энергообеспечения потребителей в автономных системах электроснабжения [18–22]. Задачи оптимизации состава оборудования в таких системах являются главными [23–32].

Анализ параметров окружающей среды

Описание параметров окружающей среды является первым шагом при использовании возобновляемых источников энергии. Функция скорости ветра и интенсивность солнечного излучения необходимы для определения потенциально возможной генерации и как следствие экономической эффективности ВИЭ.

Наиболее известными подходами к описанию функции скорости ветра при оптимизации состава оборудования автономных систем электроснабжения являются аналитические зависимости Вейбулла и Релея [33–38]. Согласно [39], замена реальных эмпирических данных на сколь угодно приближенную их аппроксимацию неизбежно ведет к менее точному в математическом и физическом смыслах результату.

При определении среднемесячной солнечной радиации в большинстве случаев используется открытая база данных NASA SSE [18, 23, 31, 40–45]. Однако, согласно первоисточнику [46], измеренные на метеостанции значения прямой, рассеянной солнечной радиации и её составляющих, являются более точными по сравнению с данными, получаемыми со спутников. При этом следует отметить, что для корректной оценки фотоэлектрического потенциала местности необходимо иметь метеонаблюдения как минимум за пятилетний период [47].

Особенно необходимо отметить, что использование среднемесячных метеоданных (скорость ветра, солнечная радиация, давление, температура воздуха и т. д.), взятых с различных открытых источников, не учитывает корреляцию между параметрами окружающей среды. Поэтому в рамках данной работы используется программно-вычислительный комплекс «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации». В рамках данного комплекса используются многолетние массивы параметров окружающей среды (скорость ветра, давление, облачность, температура воздуха и т. д.), зафиксированные на ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции. Такие массивы есть в открытом доступе и представляют собой совокупность срочных измерений (каждые 3 часа). Количество лет метеона-

блюдений на текущий момент даже для отдаленных населенных пунктов России составляет от десяти до двенадцати [48].

Обработка многолетних метеорологических рядов

Многолетние метеорологические ряды, полученные на основании срочных измерений (каждые 3 часа), являются достаточно детализированной информацией. Фиксирование параметров окружающей среды выполняется одновременно, что неважно учитывает корреляцию между ними. Фиксируются следующие параметры: скорость и направление ветра, температура воздуха, давление, влажность, облака нижнего яруса (слоисто-кучевые, слоистые, слоисто-дождевые, кучево-дождевые), высота облаков, облака среднего яруса (высококучевые, кучевые, высокослоистые), облака верхнего яруса (перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака), общая облачность, а также процент облаков плохой погоды [48]. В целом такие массивы можно представить в виде следующих матриц.

Матрица приборных измерений параметров окружающей среды

$$\begin{bmatrix} t & v_{wind} & T_{air} & P_{air} \\ t_0 & v_0 & T_0 & P_0 \\ t_1 & v_1 & T_1 & P_1 \\ t_2 & v_2 & T_2 & P_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & v_n & T_n & P_n \end{bmatrix}$$

и матрица наблюдательной оценки параметров окружающей среды

$$\begin{bmatrix} t & C_{lt} & C_{mt} & C_{ht} & \rho_{\%cloud} & b_{\%cloud} \\ t_0 & C_{lt0} & C_{mt0} & C_{ht0} & \rho_0 & b_0 \\ t_1 & C_{lt1} & C_{mt1} & C_{ht1} & \rho_1 & b_1 \\ t_2 & C_{lt2} & C_{mt2} & C_{ht2} & \rho_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & C_{ltn} & C_{mntn} & C_{htn} & \rho_n & b_n \end{bmatrix}$$

Методика расчета солнечной радиации

Поступающая на поверхность Земли солнечная радиация непостоянна и зависит от множества изменяющихся 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

ва области видимого света, наличие в облаках водяного пара, аэрозолей и т. д.

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

Номер дня

$$\begin{aligned} n &= n_1 - (n_2 n_3) + N_d - 30; \\ n_1 &= (275 N_m / 9); \\ n_2 &= (N_m + 9) / 12; \\ n_3 &= (1 + ((N_y - 4(N_y / 4) + 2) / 3)), \end{aligned}$$

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

Средняя аномалия Солнца

$$M_s = (0,9856 t_i) - 3,289,$$

если восход

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

если закат

$$t_i = n + ((18 - (\text{lon} / 15)) / 24).$$

Истинная долгота Солнца

$$\begin{aligned} L_s &= M_s + (1,916 \sin(M_s)) + \\ &+ (0,020 \sin(2M_s)) + 282,634. \end{aligned}$$

Прямое восхождение Солнца

$$R_s = (\tan^{-1}(0,91764 \tan(L_s)) + 360) / 15.$$

Склонение Солнца

$$\begin{aligned} \sin dec &= 0,39782 \sin(L_s); \\ \cos dec &= \cos(\sin^{-1}(\sin dec)). \end{aligned}$$

Местный часовой угол Солнца

$$\begin{aligned} \cos H_s &= \left(\cos - \left(\frac{\sin dec \sin(lat)}{\cos dec \cos(lat)} \right) \right); \\ H_s &= (360 - \cos^{-1}(\cos(H))) / 15. \end{aligned}$$

Местное время восхода и захода Солнца

$$T_s = H_s + R_s - (0,0657 t_i) - 6,622.$$

Перевод полученных значений на долготу местности

$$U_i = T_s - (\text{lon} / 15).$$

Определение времени восхода и захода Солнца на рассматриваемой территории

$$L_i = U_i + UTC \mp 24.$$

Более детально с описанием алгоритма расчета времени восхода и захода Солнца можно ознакомиться в [49].

После того как определены временные интервалы, в рамках которых $H_s > 0$, производится расчет прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории. В работе используются основные положения, представленные в математической модели *Iqbal* [50].

$$\dot{I}_n = 0,9751 E_0 \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a,$$

где E_0 – корреляционный коэффициент эксцентриситета орбиты Земли

$$\begin{aligned} E_0 &= 1,00011 + 0,0034221 + 0,00128 \sin \Gamma + \\ &+ 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma; \\ \Gamma &= 2\pi((N_d - 1) / 365), \end{aligned}$$

τ_r , τ_o , τ_g , τ_w , τ_a являются коэффициентами пропускания света, которые представлены Релеевским рассеиванием, рассеиванием в озоновом слое, наличием газа и капель воды в атмосфере, а также аэрозолями.

$$\begin{aligned} \tau_r &= e^{-0,0903 m_a^{0,84} (1+m_a - m_a^{1,01})}; \\ \tau_o &= 1 - \left[\begin{aligned} &0,1611 U_3 (1 + 139,48 U_3)^{-0,3035} - \\ &- 0,002715 U_3 (1 + 0,044 U_3 + 0,0003 U_3^2)^{-1} \end{aligned} \right]; \\ \tau_g &= e^{-0,0127 m_a^{0,26}}; \\ \tau_w &= 1 - 2,4959 U_1 [(1 + 79,034 U_1)^{0,6828} + 6,385 U_1]^{-1}; \\ \tau_a &= e^{-\frac{p_{air}^{0,873} (1 + I_{ao} - I_{ao}^{0,7808}) m_a^{0,9708}}{ao}}, \end{aligned}$$

где m_a – атмосферная масса с учетом поправки на давление окружающей среды

$$m_a = m_r (p_{air} / 1013,25),$$

где p_{air} (мбар) – местное атмосферное давление и атмосферная масса $m_r = 1 / \sin \delta$.

Угол склонения Солнца

$$\delta = \sin^{-1}(\sin(23,45) \sin(360 / 365 (n_d - 81)))$$

Угол возвышения Солнца

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta.$$

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

$$U_3 = l_{oz} m_a,$$

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

World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOURDC) имеет открытую базу данных по l_{oz} [51].

$$U_1 = w m_r,$$

где w (см) – осажденная толщина водяного пара и капель воды в атмосфере. w рассчитывается с учетом поправки на температуру и давление окружающей среды wr (см)

$$w = w' (p_{air} / 1013,25)^{3/4} (273 / T_{air})^{1/2}.$$

Оптическая глубина аэрозолей

$$l_{ao} = 0,2758 l_{ao; \lambda|\lambda=0,38 \mu m} + 0,35 l_{ao; \lambda|\lambda=0,5 \mu m}.$$

AErosol RObotic NETwork (AERONET) позволяет получить многолетние данные по w' , $l_{ao; \lambda|\lambda=0,38 \mu m}$, $l_{ao; \lambda|\lambda=0,5 \mu m}$ [52].

$$\dot{I}_b = \sin \alpha \dot{I}_n C_{c-dr},$$

где $\sin \alpha$ (градусы) угол возвышения и C_{c-dr} коэффициент уменьшения прямой солнечной радиации за счет облачности.

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

где N зависит от степени покрытия неба облаками в определенный момент времени (3 часовой интервал) – измеряется в октантах (oktas) [53, 54]

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

$$\dot{I}_d = (\dot{D}_r + \dot{D}_a + \dot{D}_m) C_{c-df},$$

где \dot{D}_r – Релеевское рассеивание солнечной радиации после прохода атмосферы.

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

где

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

Аэрозольное рассеивание солнечной радиации при проходе через атмосферу

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

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa}.$$

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

$$\dot{D}_m = \frac{(\dot{I}_n \sin \alpha + \dot{D}_r + \dot{D}_a) \rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a};$$

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

где ρ_a^{ct} – альbedo облаков относительно каждого временного интервала, %. Зависит от типа и состава облаков [55].

Суммарная солнечная радиация, Вт·м²

$$\dot{I}_t = \dot{I}_b + \dot{I}_d.$$

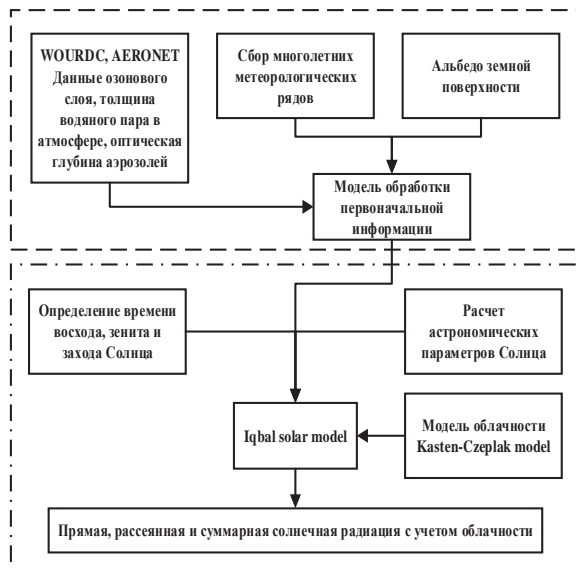


Рис. 1. Блок-схема, укрупненно описывающая представленную методику

Fig. 1. Block diagram describing the methodology as a whole

На рис. 1 укрупненно представлена блок-схема, описывающая представленную в работе методику.

Данная методика реализована в программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации». Программно-вычислительный комплекс реализован на высокоуровневом языке программирования *Matlab R2014a*. При исследовании использовался компьютер со следующими характеристиками: Intel (R) Core (TM) i5-4690, 4×3.50 GHz, 8 Gb RAM

Выбор объектов исследования

В работе рассматривается ряд населенных пунктов республики Якутия, расположенных как в относительной близости к полярному кругу, так и за ним.

Такой выбор продиктован следующими целями:

- 1) показать состоятельность модели с учетом сложных астрономических явлений, таких как полярная ночь и полярный день;
- 2) продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов, взятых из открытых источников для моделирования солнечной радиации;
- 3) выполнить статистический анализ полученных результатов с последующими выводами о возможности их использования.

В табл. 1 представлены населенные пункты, географические координаты, количество лет метеонаблюдений и код передачи метеорологических данных.

Таблица 1. Общие сведения рассматриваемых объектов

Table 1. Overview the objects under consideration

Населенный пункт Settlement	Географические координаты Geographical coordinates	Кол-во лет наблюдений Number of years of observations	Код передачи данных Data transfer code
Алдан Aldan	58,36 с.ш., N 125,23 в.д., E	12	FM 12 SYNOP
Якутск Yakutsk	62,01 с.ш., N 129,43 в.д., E		
Оймякон Oymyakon	63,27 с.ш., N 142,47 в.д., E		
Черский Chersky	68,45 с.ш., N 161,19 в.д., E		
Тикси Tiksi	71,38 с.ш., N 128,52 в.д., E		
Саскылах Saskylakh	71,57 с.ш., N 114,05 в.д., E		
Верхоянск Verkhoyansk	67,33 с.ш., N 133,23 в.д., E		
Усть-Мома Ust-Moma	66,27 с.ш., N 143,13 в.д., E		

Как видно, количество лет метеонаблюдений, находящихся в открытом источнике, составляют 12. FM 12 SYNOP – это код для оперативной передачи данных приземных гидрометеорологических наблюдений с сети станций гидрометслужбы, расположенных на суше (включая береговые станции).

Данные о толщине озонового слоя можно получить только с метеостанций, имеющих соответствующее измерительное оборудование. Например, в республике Якутия такие метеостанции находятся в населенных пунктах Якутск и Витим.

На рис. 2 показано изменение толщины озонового слоя по данным наблюдений метеостанции г. Якутска на протяжении 12 лет [51].

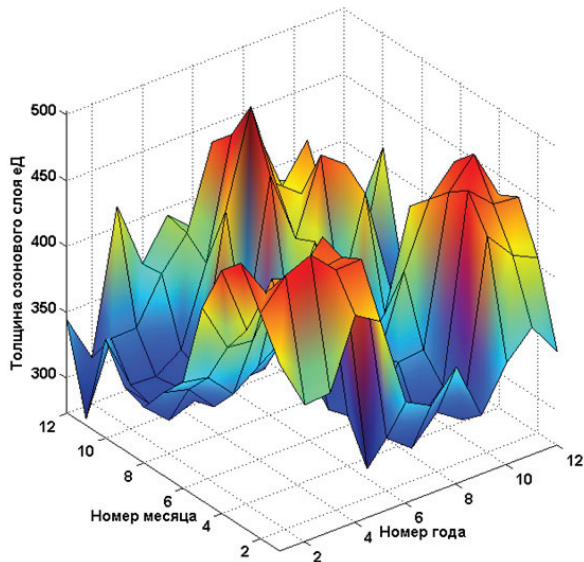


Рис. 2. Изменение толщины озонового слоя по данным наблюдений метеостанции г. Якутска на протяжении 12 лет расчетного периода

Fig. 2. Change in the ozone layer thickness by the observations of the meteorological station of Yakutsk for 12 years of the calculation period

В расчетах принимается, что данные о толщине озонового слоя, зафиксированные на метеостанции Якутска, распространяются для всех населенных пунктов Республики Якутия.

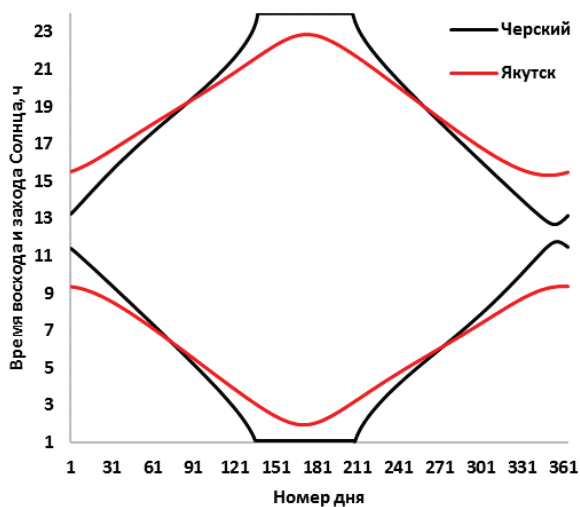


Рис. 3. Восход и заход Солнца в течение года в населенных пунктах Якутск и Черский

Fig. 3. Sunrise and sunset during the year in the settlements of Yakutsk and Chersky

Представим полученные результаты расчета восхода и захода Солнца в населенных пунктах Якутск и Черский на рис. 3.

В рамках полученных временных интервалов (между восходом и заходом Солнца) определяются основные метеорологические и астрономические параметры, по которым производится расчет прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность на рассматриваемой территории. Расчет выполняется с дискретным шагом один час. На рис. 4 показана суммарная, прямая и рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в населенном пункте Черский на протяжении 12 лет.

В табл. 2 показана суммарная солнечная радиация, по годам метеонаблюдений.

Таблица 2. Суммарная солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность в рассматриваемых населенных пунктах по годам метеонаблюдений

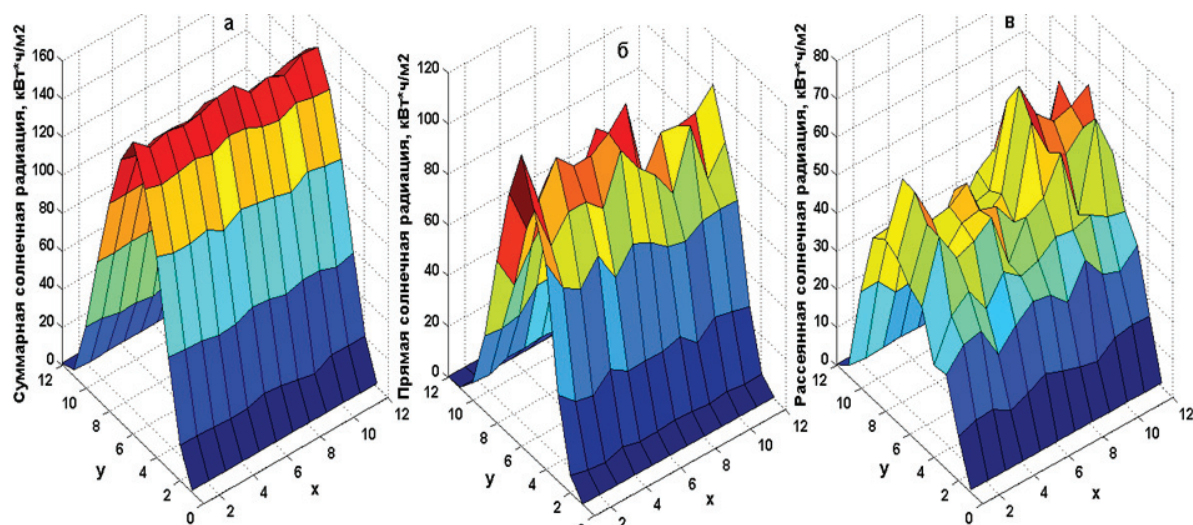
Table 2. Summary solar radiation arriving on horizontal surface in the settlements by years of weather observations

		Суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м ² Summary solar radiation, kW·h/m ²							
Номер года Number of the year	Алдан Aldan	Якутск Yakutsk	Оймякон Oymyakon	Черский Chersky	Тикси Tiksi	Сасълах Saskylakh	Верхоянск Verkhoyansk	Усть-Мона Ust-Mona	
1	252,7	1064,6	1040,1	862,79	719,99	720,61	892,60	958,48	
2	203,8	1031,6	1006,4	850,30	725,02	742,02	884,39	933,72	
3	204,0	1031,8	1017,4	853,53	733,48	740,93	890,10	939,70	
4	242,6	1040,9	1022,5	854,79	724,28	725,68	886,47	927,83	
5	195,7	1027,6	996,5	850,40	731,60	733,61	881,80	927,36	
6	225,2	1042,1	1019,6	871,97	737,84	729,64	895,09	943,07	
7	246,8	1061,0	1025,8	879,88	751,26	760,70	909,44	954,67	
8	210,5	1023,2	994,9	873,76	777,66	790,39	905,29	938,33	
9	199,7	1006,2	995,3	870,14	767,12	780,44	886,85	929,54	
10	225,0	1035,7	1021,3	877,65	770,23	777,73	903,94	954,27	
11	216,8	1033,1	1006,7	888,36	790,12	778,57	895,83	934,85	
12	212,3	1024,8	1003,5	885,97	784,74	777,42	899,21	942,33	
Среднее значение Mean value	219,58	1035,21	1012,51	868,30	751,10	754,81	894,25	940,35	

Размах вариации находится в диапазоне от 27,64 до 70,12 кВт·ч/м². Минимальное и максимальное значение среднеквадратичного отклонения составляет от 8,47 до 24,52 % соответственно. Размах вариации к среднему значению (коэффициент осцилляции) составляет от 1 до 9 %. Полученные значения статистических показателей являются приемлемыми и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты расположены относительно друг друга достаточно близко. Это говорит о том, что климатические процессы, протекающие в средних и нижних слоях атмосферы, имеют ци-



* x – номер расчетного года/Number of the year, y – номер месяца в году/Month number

Рис. 4. а) суммарная; б) прямая; в) рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в населенном пункте Черский на протяжении 12 лет расчетного периода

Fig. 4. а) summary; б) direct; в) diffuse solar radiation, arriving on horizontal surface in the settlement of Chersky for 12 years of the calculation period

клический характер. Цикличность продиктована наступающими из года в год барическими депрессиями, отвечающими за долгосрочную (сезонную) климатическую обстановку на рассматриваемой территории [56].

В табл. 3 сопоставлены полученные результаты с общеизвестными открытыми источниками, такими как база данных *NASA SSE* [57].

Однако стоит упомянуть, что среднеквадратичное отклонение для суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации, взятой из *NASA SSE*, для территорий, находящихся от 60° до 90° северной широты, имеет значения 34,37, 54,14 и 33,12 % [57, 58].

Кроме того, при формировании базы данных *NASA SSE* для территории России использовались данные только с 6 метеостанций! Учитывая протяженность территории и высокоширотное расположение значительной её части, верификация данных имеет важное значение [58]. Как уже говорилось ранее, в *NASA SSE* отмечается, что реальные массивы солнечной радиации, а также её составляющие, зафиксированные непосредственно на рассматриваемой территории, являются более точ-

ной информацией, по сравнению с данными, получаемыми со спутников [57].

Выводы

При моделировании суммарной, прямой и рассеянной солнечной радиации необходимо выделить следующие закономерности.

1. Постепенное приближение к 67° (и далее) северной широте, где наблюдаются астрономические явления: полярная ночь и полярный день, увеличивает среднеквадратичное отклонение. Это, в первую очередь, связано с менее точным определением временных интервалов, при которых Солнце находится (или отсутствует) на горизонте с учетом вышеописанных явлений.
2. ТанDEM математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*, дополненный многолетними метеорологическими рядами, взятыми непосредственно с ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции и другими параметрами из открытых источников, позволяет максимально детализировано воспроизводить актинометрические процессы с минимальными отклонениями, что является вполне приемлемым

Таблица 3. Сопоставление полученных среднегодовых значений суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, для рассматриваемых населенных пунктов с данными из [57]

Table 3. Comparison of the mean annual values of total solar radiation with the data in [57]

Населенный пункт Settlement	Алдан Aldan	Якутск Yakutsk	Оймякон Oymyakon	Черский Chersky	Тикси Tiksi	Саскылах Saskylakh	Верхоянск Verkhoyansk	Усть-Момы Ust-Moma
Среднее значение, кВт·ч/м ² Mean value, kW·h/m ²	1219,58	1035,21	1012,51	868,30	751,10	754,81	894,25	940,35
[57], кВт·ч/м ² (kW·h/m ²)	1091,32	1084,15	1051,24	905,23	781,12	795,35	949,11	952,65

для данных явлений, имеющих стохастический, осциллирующий характер.

- Использование данной методики позволяет с фиксированным шагом дискретизации определять солнечную радиацию на протяжении всего периода метеонаблюдений. В отличие от базы данных *NASA SSE*, где находятся только среднемесячные значения (итого 12), в представленной методике итоговые массивы имеют размерность 105120×3 (итого 12 лет расчетного периода).
- Получаемые массивы позволяют достаточно точно определять эффективность использования фотоэлектрических преобразователей в автономных системах электроснабжения с учетом фактических режимов работы электротехнического оборудования (сетевые и батарейные инверторы, аккумуляторные батареи и т. д.) с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2016. URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- The European Wind Energy Association (EWEA). Wind energy today. URL: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today> (дата обращения: 25.03.2017).
- Solar power Europe. New global market outlook 2016–2020. URL: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Events/SolarPower_Webinar_Global_Market_Outlook.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- The Guardian. Slump in oil prices drives green energy take up in top exporting nations. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/20/slump-in-oil-prices-drives-green-energy-take-up-in-top-exporting-nations> (дата обращения: 25.03.2017).
- The Guardian. Paris climate deal: nearly 200 nations sign in end of fossil fuel era. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/12/paris-climate-deal-200-nations-sign-finish-fossil-fuel-era> (дата обращения: 25.03.2017).
- Communication from the commission to the European Parliament and the council. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_eec_communication_adopted_0.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- Presidential Documents. Planning for Federal Sustainability in the Next Decade. March 25, 2015. Part II. The President. URL: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf> (дата обращения: 25.03.2017).
- Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. URL: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- Прогноз министра энергетики РФ о ВИЭ URL: <https://rg.ru/2016/06/06/razvitiu-alternativnoj-energetiki-v-rf-nuzhen-stimul.html> (дата обращения: 25.03.2017).
- Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 91. – P. 53–63.
- Law of the Republic of Belarus – about renewable energy (December 27, 2010. N 204-3) URL: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (дата обращения: 25.03.2017).
- Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review //

Заключение

В работе представлена методика использования многолетних метеорологических рядов при определении суммарной, прямой и рассеянной солнечной радиации. Представлены расширенные математические модели *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*, реализованные в программно-вычислительном комплексе «*Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации*». Произведены актинометрические расчеты для различных населенных пунктов Республики Якутия, а также сопоставлены с результатами *NASA SSE*. Представлены основные выводы, которые позволяют с уверенностью утверждать о состоятельности использования представленной методики и реализующего её программно-вычислительного комплекса для определения солнечной радиации с фиксированным шагом дискретизации для решения научно-прикладного характера.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 58. – P. 87–106.
- Govinda R. Timilsina., Kalim U. Shah. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States // *Energy Policy*. – 2016. – V. 98. – P. 653–662.
- Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters above 10 kW // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008. – V. 15. – P. 1250–1257.
- «РАО ЕЭС Востока». URL: <http://www.rao-esv.ru/map> (дата обращения: 25.03.2017).
- «Сахаэнерго». URL: <http://saxaenergo.ru/> (дата обращения: 25.03.2017).
- «Саханефтегазбыт». URL: <http://www.sngs.ykt.ru> (дата обращения: 25.03.2017).
- Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – V. 86. – P. 709–716.
- Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
- Карамов Д.Н. Влияние объектов агропромышленного комплекса, на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 8. – С. 107–112.
- The Multiple Role of Energy Storage in the Industrial Sector: Evidence from a Greek Industrial Facility / D. Zafirakis, C. Elmasides, D.U. Sauer, M. Leuthold, G. Merei, J.K. Kaldellis, G. Vokas, K.J. Chalvatzis // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 46. – P. 178–185.
- Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil / C.E. Camargo Nogueira, M.L. Vidotto, R.K. Niedzialkoski, S.N. Melegari de Souza., L.I. Chaves, Th. Edwiges, D. Bentes dos Santos, I. Werncke // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
- Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage / R. Dufo-López, J.L. Bernal-Agustín, J.M. Yusta-Loyo,

- J.A. Domínguez-Navarro, I.J. Ramírez-Rosado, J. Lujano, I. Aso // *Applied Energy*. – 2011. – V. 88. – P. 4033–4041.
24. Dufo-Lopez R., Cristobal-Monreal I.R., Yusta J.M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 94. – P. 280–293.
25. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions // *Applied Energy*. – 2015. – V. 140. – P. 395–408.
26. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology // *Applied Energy*. – 2008. – V. 85. – P. 1086–1101.
27. Banu Yetkin Ekren, Orhan Ekren. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1387–1394.
28. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 592–598.
29. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
30. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // *Solar Energy*. – 2013. – V. 97. – P. 460–473.
31. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 380–389.
32. Getachew Bekele, Gelma Boneya. Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 14. – P. 1760–1765.
33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // *Renewable Energy*. – 2004. – V. 29. – P. 1793–1809.
34. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations // *Energy Procedia*. – 2011. – V. 6. – P. 666–677.
35. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions / B.O. Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kebe, P.A. Ndiaye, M. Ndongo // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 195. – P. 1636–1647.
36. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia / E.M.A. Mokheimer., A.Z. Sahin., A. Al-Sharafi., A.I. Ali // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 75. – P. 86–97.
37. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. Modeling of hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008. – V. 12. – P. 235–249.
38. Wind potential assessment of Quebec Province / A. Pinca, E. McCarthy, J.-L. Chaumel, J.-L. Retiveau // *Renewable Energy*. – 2003. – V. 28. – P. 1881–1897.
39. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. – М.: Изд-во «Атмограф», 2008. – 584 с.
40. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 119. – P. 279–288.
41. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic) / Diesel systems for off-grid applications / D. Tsuanyo., Y. Azoumah., D. Aussel., P. Neveu // *Energy*. – 2015. – V. 86. – P. 152–163.
42. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems // *Energy*. – 2013. – V. 63. – P. 19–27.
43. Esfahani I.J., Yoo Ch.K. An optimization algorithm-based pinch analysis and GA for an off-grid batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis desalination system // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 91. – P. 233–248.
44. Sinha S., Chandel S.S. Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 105. – P. 1340–1351.
45. Amit Kumar Yadav., Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 75. – P. 675–693.
46. Surface meteorology and Solar Energy. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s06#s06> (дата обращения: 25.03.2017).
47. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
48. RP5.ru – Reliable Prognosis. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 25.03.2017).
49. Sunrise/Sunset Algorithm. Almanac for Computers, 1990 published by Nautical Almanac Office United States Naval Observatory Washington, DC 20392. URL: http://www.edwilliams.org/sunrise_sunset_algorithm.htm (дата обращения: 25.03.2017).
50. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model // *Applied Energy*. – 2001. – V. 69. – P. 191–224.
51. Vertical ozone-layer thickness. URL: <http://woudc.org> (дата обращения: 25.03.2017).
52. AERONET. AErosol RObotic NETwork. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.03.2017).
53. Parameterization of solar radiation from model and observations / K. Lengfield, A. Macke, U. Feister, J. Güldner // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2010. – V. 19. – P. 25–33.
54. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud // *Solar Energy*. – 1980. – V. 24. – P. 177–189.
55. Global patterns in daytime cloud properties derived from GOME backscatter UV-VIS measurements / R. Loyola, W. Thomas, R. Spurr, B. Mayer // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – V. 31. – P. 4295–4318.
56. Badescu V., Dumitrescu A. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 67. – P. 75–91.
57. NASA SSE. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.03.2017).
58. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных) / О.С. Попель, Е.С. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.

Поступила 24.05.2017 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.9

MATHEMATICAL MODELING OF SOLAR RADIATION BASED ON OPEN ACCESS LONG-TERM METEOROLOGICAL OBSERVATION DATA

Dmitriy N. Karamov,
dmitriy.karamov@mail.ru.

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
130, Lermontov street, Irkutsk, Russia, 664033.

The relevance of the discussed issue is caused by increasing interest in employing renewable energy sources generators in autonomous energy systems of Siberia and Far East.

The main aim of the study is to demonstrate the appliance of long-term local meteorological observations for implementation in mathematical models of Iqbal and Kasten-Czeplak for modeling solar radiation over the arctic area of Siberia and Far East.

The methods used in the study. The paper uses well-studied mathematical model of solar radiation presented by Iqbal using mathematical models for cloudiness analysis submitted by Kasten-Czeplak. The open access long-term observations data obtained from different meteorological stations are used as input. The author applies the high-level programming language Matlab.

The results. The data obtained revealed the relationship of latitude standard deviation and solar radiation. Mathematical modeling of summary, direct and diffuse solar radiation within 12-years period for various localities was carried out. The author obtained the matrices of solar radiation with dimensions of 105120×3, developed the software complex for local analysis of environment parameters and solar radiation. The obtained results were analyzed and verified. It was shown that the results can be used in further studies.

Key words:

Renewable energy sources, solar radiation, meteorological series, cloud cover, Iqbal model, Kasten-Czeplak model.

REFERENCES

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable energy statistics 2016*. Available at: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (accessed 25 March 2017).
2. The European Wind Energy Association (EWEA). *Wind energy today*. Available at: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today> (accessed 25 March 2017).
3. *Solar power Europe. New global market outlook 2016–2020*. Available at: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Events/SolarPower_Webinar_Global_Market_Outlook.pdf (accessed 25 March 2017).
4. *The Guardian. Slump in oil prices drives green energy take up in top exporting nations*. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/20/slump-in-oil-prices-drives-green-energy-take-up-in-top-exporting-nations> (accessed 25 March 2017).
5. *The Guardian. Paris climate deal: nearly 200 nations sign in end of fossil fuel era*. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/12/paris-climate-deal-200-nations-sign-finish-fossil-fuel-era> (accessed 25 March 2017).
6. *Communication from the commission to the European Parliament and the council. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*. Available at: http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_energy_efficiency_communication.pdf (accessed 25 March 2017).
7. *Presidential Documents. Planning for Federal Sustainability in the Next Decade*. March 25, 2015. Part II. The President. Available at: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf> (accessed 25 March 2017).
8. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda* [Energy Strategy of Russia for the period up to 2035]. Available at: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf (accessed 25 March 2017).
9. *Prognoz ministra energitiki RF o VIE* [The forecast of the Minister of Energy of the Russian Federation on RES]. Available at: <https://rg.ru/2016/06/06/razvitiu-alternativnoj-energetiki-vrf-nuzhen-stimul.html> (accessed 25 March 2017).
10. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 53–63.
11. *Law of the Republic of Belarus – about renewable energy* (December 27, 2010. N 204-3) Available at: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (accessed 25 March 2017).
12. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 87–106.
13. Govinda R. Timilsina., Shah K.U. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
14. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters above 10 kW. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 15, pp. 1250–1257.
15. «RAO EES Vostoka» [«RAO Energy Systems of the East»]. Available at: <http://www.rao-esv.ru/map> (accessed 25 March 2017).
16. «Sakhaenergo» [«Sakhaenergo»]. Available at: <http://sakhaenergo.ru/> (accessed 25 March 2017).
17. «Sahaneftegazsbyt» [«Sahaneftegazsbyt»]. Available at: <http://www.sngs.ykt.ru> (accessed 25 March 2017).
18. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 86, pp. 709–716.
19. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
20. Karamov D.N. Agro-industrial complex facilities influence on the result of the complex optimization of the decentralized power supply systems using renewable energy sources. *The Bulletin of Krasnoyarsk Agrarian University*, 2015, no. 8, pp. 107–112. In Rus.
21. Zafirakis D., Elmasides C., Sauer D.U., Leuthold M., Merei G., Kaldellis J.K., Vokas G., Chalvatzis K.J. The Multiple Role of Energy Storage in the Industrial Sector: Evidence from a Greek Industrial Facility. *Energy Procedia*, 2014, vol. 46, pp. 178–185.
22. Camargo Nogueira C.E., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., Melegari de Souza S.N., Chaves L.I., Edwiges Th., Bentes dos Santos D., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property

- located in the south of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
23. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L., Yusta-Loyo J.M., Domínguez-Navarro J.A., Ramírez-Rosado I.J., Lujano J., Aso I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 4033–4041.
 24. Dufo-Lopez R., Cristobal-Monreal I.R., Yusta J.M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation. *Renewable Energy*, 2016, vol. 94, pp. 280–293.
 25. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions. *Applied Energy*, 2015, vol. 140, pp. 395–408.
 26. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 1086–1101.
 27. Ekren B.Y., Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 1387–1394.
 28. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 592–598.
 29. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.
 30. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013, vol. 97, pp. 460–473.
 31. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 380–389.
 32. Bekele G., Boneya G. Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 1760–1765.
 33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1793–1809.
 34. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations. *Energy Procedia*, 2011, vol. 6, pp. 666–677.
 35. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Ndongo M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
 36. Mokheimer E.M.A., Sahin Ah.Z., Al-Sharafi A., Ali A.I. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 86–97.
 37. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, pp. 235–249.
 38. Ilinca A., McCarthy E., Chaumel J-L., Retiveau J-L. Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, pp. 1881–1897.
 39. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *Natsionalny kadastro vetronegeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy ikh opredeleniya* [National cadaster of Russia wind energy resources and methodology for their determination]. Moscow, Atmosgraph Publ., 2008. 584 p.
 40. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 119, pp. 279–288.
 41. Tsuanyo D., Azoumah Y., Aussel D., Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 2015, vol. 86, pp. 152–163.
 42. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems. *Energy*, 2013, vol. 63, pp. 19–27.
 43. Esfahani I.J., Yoo Ch.K. An optimization algorithm-based pinch analysis and GA for an off-grid batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis desalination system. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 233–248.
 44. Sinha S., Chandel S.S. Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 105, pp. 1340–1351.
 45. Yadav A.K., Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model. *Renewable Energy*, 2015, vol. 75, pp. 675–693.
 46. *Surface meteorology and Solar Energy*. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s06#s06> (accessed 25 March 2017).
 47. Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
 48. *RP5.ru – Reliable Prognosis*. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 25 March 2017).
 49. *Sunrise/Sunset Algorithm*. Almanac for Computers, 1990 published by Nautical Almanac Office United States Naval Observatory Washington, DC 20392. Available at: http://williams.best.vwh.net/sunrise_sunset_algorithm.htm (accessed 25 March 2017).
 50. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. *Applied Energy*, 2001, vol. 69, pp. 191–224.
 51. *Vertical ozone-layer thickness*. Available at: <http://woudc.org> (accessed 25 March 2017).
 52. *AERONET. Aerosol RObotic NETwork*. Available at: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (accessed 25 March 2017).
 53. Lengfield K., Macke A., Feister U., Güldner J. Parameterization of solar radiation from model and observations. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, vol. 19, pp. 25–33.
 54. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, pp. 177–189.
 55. Loyola R., Thomas W., Spurr R., Mayer B. Global patterns in daytime cloud properties derived from GOME backscatter UV-VIS measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, vol. 31, pp. 4295–4318.
 56. 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.
 57. *NASA SSE*. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (accessed 25 March 2017).
 58. Popel O.S., Frid E.S., Kiseleva S.V., Kolomiets Yu.G., Lisitskya N.V. *Klimaticheskie dannye dlya vozobnovlyayemoy energetiki Rossii (Baza klimaticheskikh dannykh)* [Climatic data for renewable energy in Russia (Climate Data Base)]. Moscow, MFTI Publ., 2010. 56 p.

Received: 24 May 2017.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science.