

УДК 621.311

Ю.В.Шкиль (Ин-т транспортных систем и технологий "Трансмаг" НАН Украины, Днепропетровск)

Оценка статистических характеристик энергии падающего солнечного излучения на территории Украины

Виявлен вид домінуючої функції щільності розподілу енергії падаючого сонячного випромінювання на території України на основі баз даних багаторічних супутникових метеорологічних спостережень. Встановлено параметри середньорічної локалізації щільності розподілу сонячної енергії на горизонтальну поверхню одиничної площі.

Виявлено вид домінуючої функції щільності розподілу енергії падаючого сонячного випромінювання на території України на основі багаторічних супутникових баз даних метеорологічних спостережень. Встановлено параметри середньорічної локалізації щільності розподілу сонячної енергії на горизонтальну поверхню одиничної площі.

Введение. При проектировании фотоэлектрических установок (ФЭУ) важным аспектом при оценке выработки электроэнергии становится распределение плотности вероятности энергии падающего солнечного излучения, а также оценки различных параметров установок – установленной мощности панелей, их ориентации, ёмкости накопительных элементов, отдаваемая мощность. Потенциал солнечной энергии [1] служит основой при расчётах предельных значений проектных параметров, а знание о распределении позволяет судить об эффективности использования потенциала.

Исчерпывающей характеристикой временных рядов солнечной радиации при вероятностных оценках потенциала солнечной энергии для данной территории является плотность распределения энергии падающего солнечного излучения за известный промежуток времени. Наряду с временной структурой рядов солнечной радиации, большое значение имеет также и их пространственная структура. Их исследование необходимо для определения радиационных характеристик в пунктах, где актинометрические наблюдения не проводятся. Количество метеостанций, которые проводят актинометрические измерения, весьма ограничено, а их малая плотность размещения в Украине [2] осложняет получение надежных данных по территории страны. Появившиеся в последние годы новые источники метеорологической информации, основанные, в частности, на многолетних спутниковых наблюдениях за

поверхностью земного шара, предоставляют возможность получить более детальные актинометрические данные, которые могут быть использованы для оценки ресурсов солнечного излучения в различных расчётных точках.

В силу разных локальных климатических условий в каждой расчётной точке земной поверхности наблюдаются разные типы распределений, что отмечается в ряде публикаций [3–7]. Для территории Украины с её различными климатическими зонами плотность распределения имеет свои характерные особенности. Целью исследования является выявление функции плотности распределения энергии падающего солнечного излучения в течение года на поверхность единичной площади и её территориальная изменчивость.

Методика обработки данных. Для выявления вида распределения плотности энергии падающего солнечного излучения на территории Украины были использованы значения ежедневной поступающей солнечной энергии на горизонтальную площадку за период наблюдений 27 лет с использованием базы данных NASA [8].

При моделировании были выбраны расчётные точки, равномерно расположенные по всей территории с шагом по широте и долготе, равным одному градусу. Результат расчёта, проведенного для одной расчётной точки, характеризовал плотность распределения энергии падающего солнечного излучения на площади порядка 7530 км² на северной широте 52,5° и 8974 км² на северной

широте 43,5°, в среднем по 3-4 расчётных точки на область. На северной широте 52,5° расстояние между расчетными точками по длине дуги восточной долготы составляет 67,91 км, на северной широте 43,5° – 80,88 км, по северной широте – 111,11 км [9, 10]. Особенностью базы данных NASA является то, что разрешение по широте в один градус действительно имеет место, т.е. переход от одной расчётной точки к другой через один градус приводит к разным результатам в расчётах, что и должно быть в действительности. Разрешение же по долготе в один градус даёт два одинаковых результата подряд, т.е. фактически разрешение по долготе соответствует двум градусам. Это приводит к тому, что площадь одной расчётной точки равна примерно 16665 км². Расчётные значения потенциала в расчётных точках варьируются при переходе от точки к точке от 1058 кВт·ч до 1463 кВт·ч.

На первом этапе из базы данных для каждой расчётной точки за весь период наблюдения (27 лет, порядка 10 000 наблюдений) бралась ежедневная инсоляция, поступающая на 1 м² горизонтальной поверхности, были построены гистограммы и методом подгонки определялся вид распределения. На втором этапе из базы данных для каждой расчётной точки набиралась ежегодная статистика (27 лет, 365 наблюдений в каждом году), для каждого года была построена гистограмма, и методом подгонки определялся вид распределения.

Вид распределения значений радиации определялся с помощью пакета *EasyFit* (Version 5.3) [11], предназначенного для автоматической селекции видов статистических распределений. Программы пакета объединяют методы классического статистического анализа и передовые технологии анализа данных. Данный пакет включает 55 классов распределений. Аппроксимация распределений осуществляется с помощью метода максимального правдоподобия MLE (Maximum Likelihood Estimates). Тесты на наилучшую подгонку (Goodness of fit (GOF)) осуществляются с помощью критерия Колмогорова-Смирнова (Kolmogorov-Smirnov).

Результаты моделирования и обсуждение.

В результате для первого этапа установлено, что с наилучшим приближением плотность распределения описывается параметрическими распределениями Джонсона SB (Jonson SB) и Вейкеби (Wakeby). При этом 7% территории (север Ровенской области, восток Львовской области и север Тернопольской и Хмельницкой областей) – это Вейкеби, а остальная территория (93%) – Джонсон SB. Ранжирование распределений даёт следующие значения, которые сведены в таблицу 1. Как следует из анализа таблицы, для всей Украины, за небольшим исключением, характер поступления солнечной энергии на протяжении 27 лет с наибольшей точностью и в наибольшем количестве расчётных точек может описываться распределением Джонсон SB.

Таблица 1. Ранги распределений

Распределение	Ранг	Количество расчётных точек	Критерий согласия Колмогорова-Смирнова	
			Мин.	Макс.
Johnson SB	1	83	0,0148	0,0240
Wakeby	2	6	0,0149	0,0449

Для второго этапа были выявлены виды распределений (рис. 1) и тенденции в динамике распределений по расчётным точкам за каждый наблюдаемый год на периоде с 1984 по 2010 гг. За 27 лет на территории Украины в разное время и в разных регионах наблюдалось 9 видов распределений (Johnson SB, Wakeby, Dagum, Kumaraswamy, Beta, Gen.Pareto, Gen.Gamma, Log.Pearson, Power Function). Из общего числа наблюдений распределений (2043) распределение Jonson SB наблюдалось 72,5% случаев, Wakeby – 23,8% и все остальные – 3,7% случаев. Распределение Джонсона SB доминировало практически на всём периоде наблюдений. Динамика доминирования может быть представлена диаграммой рассеяния, где аргументом является время, а функцией – количество расчётных точек, где наблюдалось распределение Джонсон SB в течение года. Такая диаграмма представлена на рис. 2. Там же представлен график функции тренда.

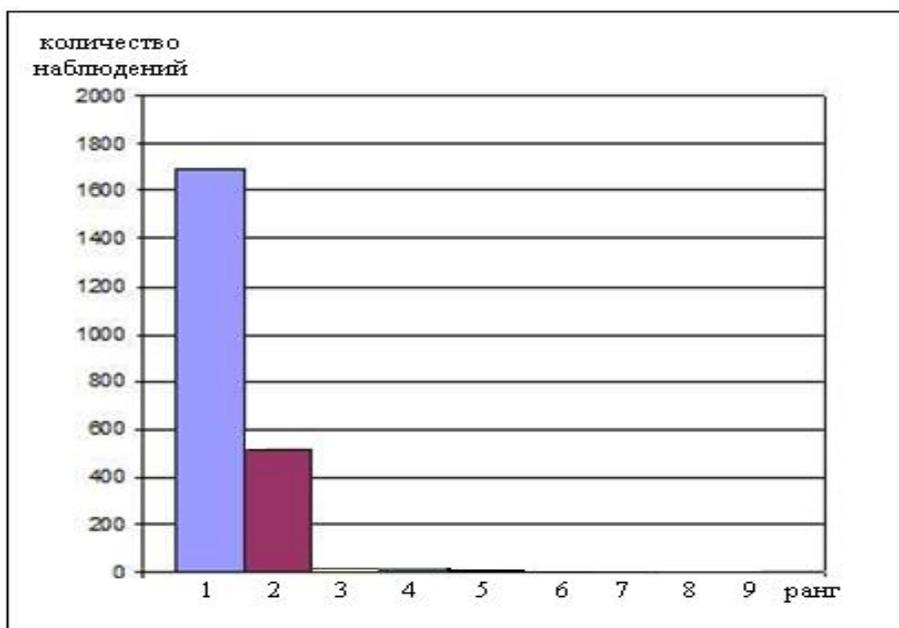


Рис. 1. Ранжированный ряд видов распределений в расчётных точках территории Украины за период 1984-2010 гг.:
 1 – Джонсон (72,7%); 2 – Вейкеби (23,8%); 3 – Бета (1,1%); 4 – Дагум (0,79%); 5 – Кумарасвами (0,79%); 6 – Парето (0,37%);
 7 – Гамма (0,33%); 8 – Лог-Пирсон (0,080%); 9 – степенное (0,040%).
 В скобках указана доля распределения в отношении к общему количеству наблюдений.

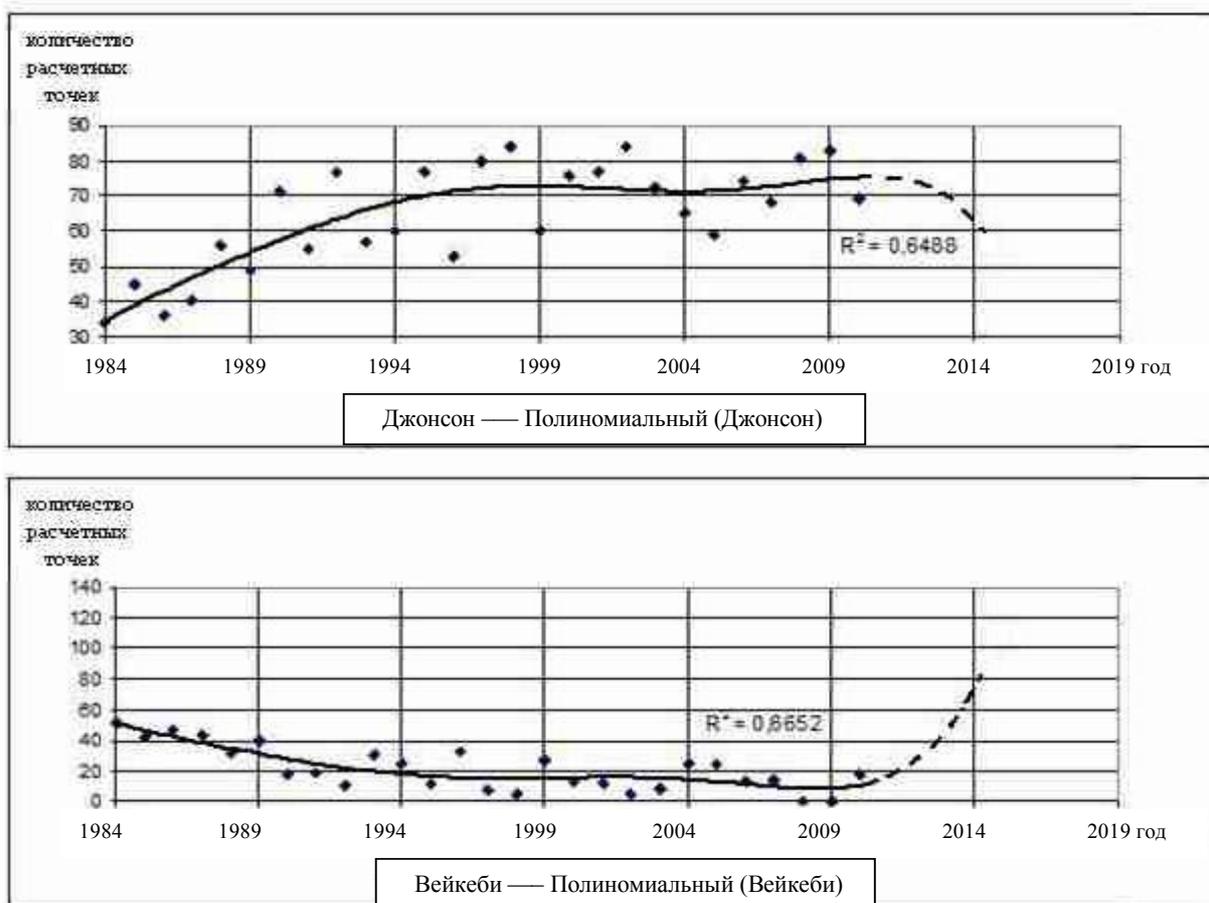


Рис. 2. Диаграммы рассеяния и тренды доминирующих распределений Джонсона SB и Вейкеби.
 R^2 – коэффициент детерминации.



Рис. 3. Геометризация распределения Джонсона SB плотности энергии падающего солнечного излучения по регионам Украины.

Аналогичная диаграмма представлена для распределения Вейкеби. Исходя из анализа графиков, можно предположить о возможном перераспределении доминирования в будущем – доля Джонсона SB уменьшается, в то время как доля Вейкеби возрастает. Следует отметить, что за 27 лет наблюдений зарегистрировано несколько расчётных точек, охватывающих восток Херсонской области, юг Запорожской области и север АР Крым, где распределение энергии падающего солнечного излучения всегда наилучшим образом описывалось распределением Джонсона SB и ни разу каким-либо другим.

Пространственная неоднородность доминирующего распределения по полученным данным может характеризоваться геометризацией (окультуриванием) зон, имеющих устойчивую вероят-

ность существования распределения за почти тридцатилетний период наблюдений (рис. 3). На рисунке потенциал указан в выносках, вероятность выделена интенсивностью окраски.

Для установления зависимости параметров распределения Джонсона SB от солнечного потенциала из общего массива расчётных точек были отобраны все неповторяющиеся точки с возрастающим потенциалом W от 1058,5 кВт·ч до 1463,65 кВт·ч и соответствующие этим точкам параметры распределений Джонсона SB, что представлено в таблице 2. Из всех расчётных точек, представленных в таблице 2, выбраны девять, характеризующие солнечным потенциалом в диапазоне от 1058,5 кВт·ч до 1463,65 кВт·ч и по данным для этих точек построены графики плотности распределений.

Таблица 2. Значения параметров распределения Джонсона SB плотности потока энергии падающего солнечного излучения в зависимости от потенциала

Обозначение параметра	Значение параметра								
	γ	0,535	0,6018	0,5381	0,5395	0,6658	0,5086	0,5432	0,5238
δ	0,6378	0,6638	0,6388	0,6408	0,7125	0,6402	0,6322	0,639	
λ	7,6751	7,8073	7,6064	7,7853	8,0042	7,7474	7,7714	7,8147	
ξ	0,207	0,2674	0,2517	0,1929	0,3099	0,1636	0,2646	0,2281	
w	1058	1062	1065	1069	1073	1077	1087	1095	
γ	0,4722	0,49	0,4636	0,4899	0,431	0,456	0,4571	0,4418	
δ	0,6221	0,6266	0,5986	0,6041	0,6052	0,6178	0,5973	0,6005	
λ	7,7132	7,7482	7,6064	7,7314	7,55	7,6544	7,6911	7,7127	
ξ	0,1862	0,2302	0,2584	0,2881	0,2604	0,2874	0,3182	0,2782	

Обозначение параметра	Значение параметра								
	w	1102	1105	1109	1120	1127	1135	1149	1153
γ	0,4598	0,3816	0,3823	0,3512	0,3818	0,4056	0,3631	0,3818	
δ	0,6174	0,5661	0,5906	0,5765	0,5918	0,6169	0,5861	0,5918	
λ	7,7971	7,4901	7,5711	7,6104	7,7435	7,9185	7,5903	7,7435	
ξ	0,2869	0,3543	0,3148	0,3519	0,336	0,2983	0,3262	0,336	
w	1157	1178	1182	1186	1189	1193	1200	1215	
γ	0,4056	0,3512	0,383	0,3415	0,3277	0,3371	0,2944	0,3453	
δ	0,6169	0,5765	0,6193	0,6052	0,5964	0,5852	0,5595	0,5951	
λ	7,9185	7,6104	7,5108	7,6877	7,6876	7,6895	7,5275	7,776	
ξ	0,2983	0,3519	0,3197	0,3147	0,3175	0,3538	0,3633	0,3471	
w	1219	1222	1226	1233	1244	1248	1251	1255	
γ	0,3466	0,3107	0,3132	0,2843	0,2946	0,2724	0,216	0,1821	
δ	0,6253	0,576	0,5794	0,6104	0,5475	0,5048	0,4855	0,4702	
λ	7,8378	7,8182	7,8248	7,6813	7,7116	8,0282	7,8786	8,0353	
ξ	0,3361	0,3966	0,4437	0,4076	0,4952	0,4635	0,4223	0,5045	
w	1266	1292	1303	1310	1321	1365	1379	1463	

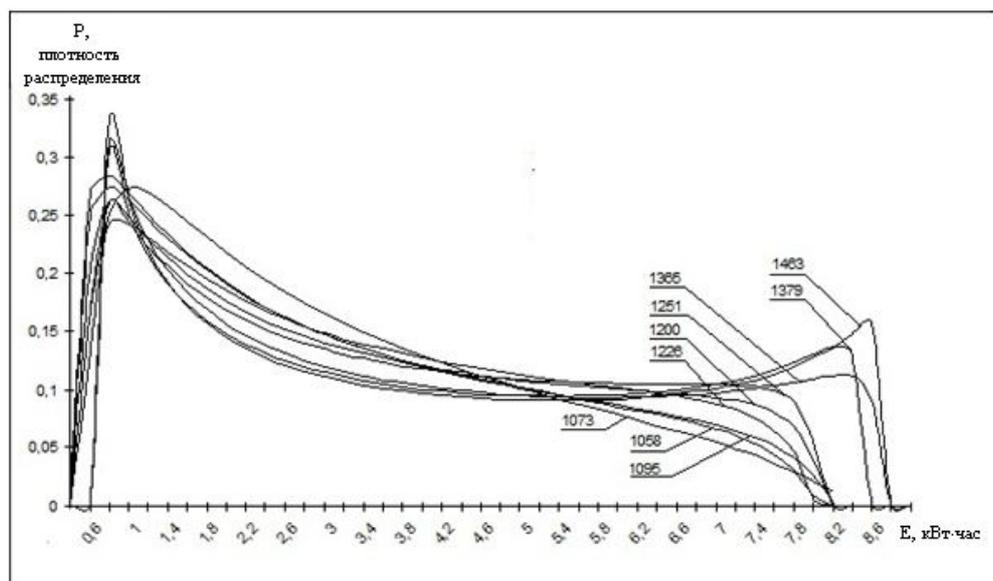


Рис. 4. Семейство выборочных плотностей распределения Джонсона SB энергии падающего солнечного излучения в зависимости от потенциала (в выносках указан среднегодовой потенциал расчётной точки в кВт·ч; по горизонтальной оси отложено значение ежесуточного поступления солнечной энергии на горизонтальную поверхность площадью 1 м²).

Сопоставление графиков показывает, что рост потенциала солнечной энергии коррелирует с ростом "тяжести" хвоста и последующим формированием двухмодового распределения (рис. 4).

Четырёхпараметрическое распределение Джонсона SB хорошо согласуется с наблюдениями поступления солнечной энергии на земную поверхность. Во-первых, в плотности распределения чётко фиксируются экстремальные значения энергии падающего излучения, что соответствует

реальному процессу: минимальное и максимальное имеют конечные значения. Во-вторых, по мере роста потенциала плавный рост "тяжести" хвоста с последующим формированием второй моды отражает процесс поступления энергии в зависимости от ряда факторов, в том числе сезона, времени суток и состояния облачного покрова. Первая мода свидетельствует о наличии всегда имеющей место рассеянной радиации (утренняя и вечерняя зоря, облачность), а вторая мода свиде-

тельствует о наличии или отсутствии дней солнечного сияния или слабой облачности. Ближайшее по точности пятипараметрическое распределение Вейкеби не обладает такими свойствами, хотя и удовлетворительно описывает рассматриваемые процессы.

Распределение Джонсона SB описывается следующим выражением:

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x-\xi) \cdot (\lambda-x+\xi)} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma + \delta \cdot \ln \left(\frac{x-\xi}{\lambda-x+\xi} \right) \right]^2 \right\},$$

где δ и γ – параметры формы; λ – параметр рассеяния; ξ – параметр положения.

Распределение Вейкеби описывается следующим выражением:

$$f(x) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} (1 - (1 - F)^\beta) - \frac{\gamma}{\delta} (1 - (1 - F)^{-\delta}),$$

где β и δ – параметры формы; α и γ – параметры рассеяния; ξ – параметр положения.

Распределения Джонсона SB и Вейкеби [12]

относятся к классу распределений экстремальных величин с несимметричным распределением вероятностей, что в литературных источниках получило название распределений с "тяжелым" или "лёгким" хвостом распределения. Для зон с наибольшим потенциалом солнечной энергии хвосты имеют выраженный подъём, для зон с пониженным потенциалом характерен пологий хвост, что отражено на графиках распределений (рис. 4).

Для всей совокупности распределений, представленных в табл. 2, диапазон рассеяния трёх параметров заключён в пределах от нуля до единицы (γ от 0,1821 до 0,535; δ от 0,4702 до 0,6378; ξ от 0,207 до 0,5045) и одного параметра от нуля до десяти (λ от 7,4971 до 8,0353), что позволяет на одном графике и в одном масштабе построить зависимости изменений параметров распределения от потенциала (рис. 5). Построенные линии регрессии, приведенные на рисунке, имеют аналитические выражения, которые связывают параметры распределения γ , ξ , δ , λ с плотностью распределения $f(x)$ и локальным потенциалом $x(t)$.

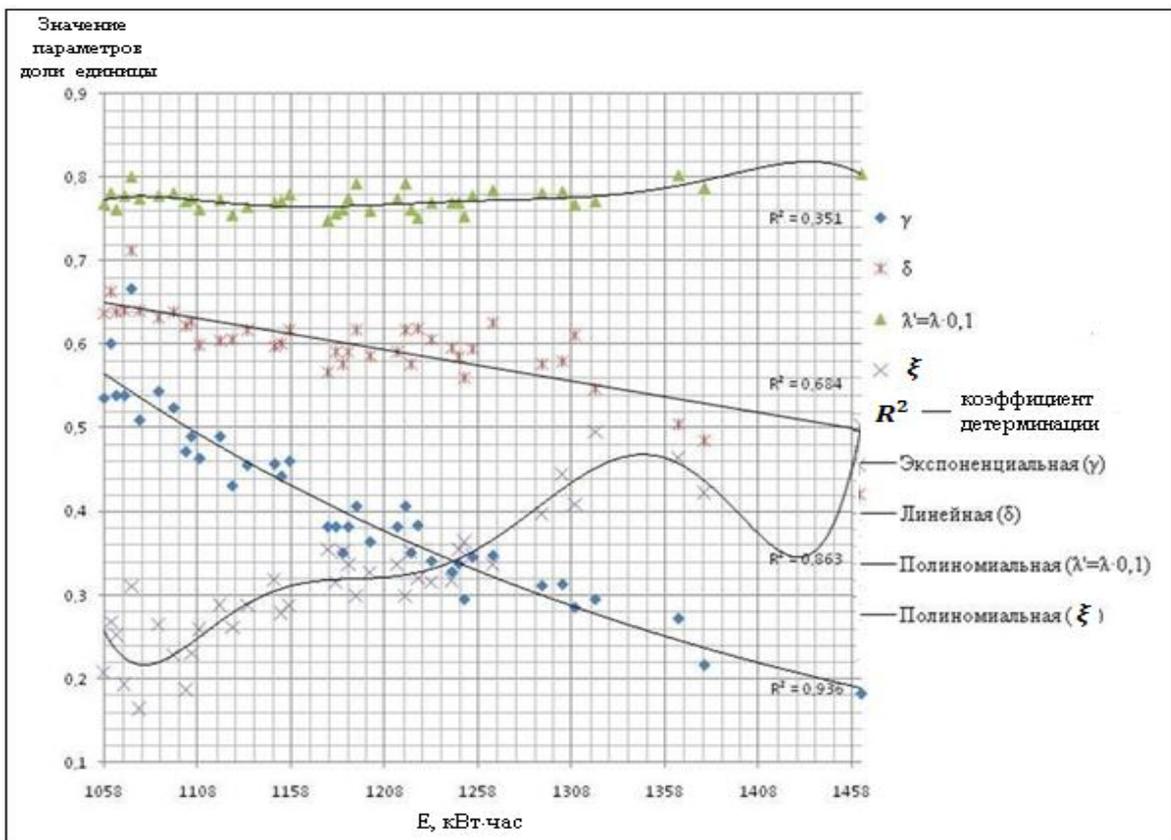


Рис. 5. Зависимость изменений параметров распределения Джонсона SB от потенциала.

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x - \xi) \cdot (\lambda - x + \xi)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma + \delta \cdot \ln \left(\frac{x - \xi}{\lambda - x + \xi} \right) \right]^2 \right\}$$

$$\gamma = 9,787e^{-0,003x}$$

$$\xi = 2 \cdot 10^{-14} x^6 - 10^{-10} x^5 + 4 \cdot 10^{-7} x^4 - 0,0007x^3 + 0,628x^2 - 310,41x + 63775$$

$$\delta = -0,0004x + 1,0478$$

$$\lambda' = -2 \cdot 10^{-15} x^6 + 10^{-11} x^5 - 5 \cdot 10^{-8} x^4 + 8 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,071x^2 + 35,385x - 7278,4$$

$$x(t) = D_{IP} + D_{PAC} + D_{OTP}$$

Последнее выражение $x(t)$ есть сумма прямой D_{IP} , рассеянной D_{PAC} и отражённой D_{OTP} радиации солнечного излучения. Имея координаты расчётной точки, базу данных солнечной инсоляции или модель солнечного потенциала в расчётной точке, можно вычислить усреднённую плотность распределения в этой точке.

Выводы. В результате статистической обработки массива данных многолетних наблюдений инсоляции выявлено доминирующее распределение плотности энергии падающего солнечного излучения – это распределение Джонсона SB для всей территории Украины.

Выявленное распределение и его территориальное районирование имеет существенное значение для исследования рисков обеспеченности потребителя солнечной энергии на периоде в один год.

В дальнейших исследованиях представляет интерес выявление усреднённого вида распределения на периодах в один месяц и квартал, и сравнение результатов для различных баз данных.

Полученные результаты позволяют, имея координаты расчётной точки, базу данных солнечной инсоляции или модель солнечного потенциала в расчётной точке, оценивать усреднённую плотность распределения в этой точке, что повышает достоверность прогнозирования эффективности работы проектируемых фотоэлектрических систем.

1. Кудря С.О., Резцов В.Ф., Суржик Т.В., Яценко Л.В. *та ін.* Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2010. – 71 с.

2. *Справочник по климату СССР. Вып. 10.* Украинская ССР. Часть 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. 1966. – 124 с.

3. Assuncao H. F., Escobedo J. F., Oliveira A.P. Modeling frequency distributions of 5 minute-averaged solar // Theoretical and Applied Climatology. – 2003. – № 75. – P. 213 – 224.

4. Tovar J., Olmo F.J., Bariles F. J., Alados-Arboledas L. Dependence of one-minute global irradiance probability density distributions on hourly irradiation // Energy. – 2001. – № 26. – P. 659–668.

5. Clifford W. Hansen, Joshua S. Stein, Abraham Ellis. Statistical Criteria for Characterizing Irradiance Time Series // Sandia Report SAND 2010-7314. – October 2010. – 51 p.

6. Sengupta M. Measurement and Modeling of Solar and PV Output Variability // Conference Paper NREL/CP-5500-51105. – April 2011. – 7 p.

7. Дзензерский В.А., Каспрук Е.В., Хачатуридзе Н.М., Шкиль Ю.В. Оценка статистических характеристик падающей энергии солнечного излучения /Відновлювана енергетика XXI століття. Матеріали XII Міжнародної конференції, АР Крим, смт. Миколаївка, 12 – 16 вересня 2011 р. – С. 156–160.

8. Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release6.0). // Режим доступа: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.

9. Онлайн калькулятор: Расстояние между двумя координатами. // Режим доступа: <http://planetcalc.ru/722/>.

10. Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations // Survey Review. – Vol. XXIII. – No.176 April, 1975. – P. 88 – 93.

11. EasyFit Professional v5. 3. // Режим доступа: <http://www.mathwave.com/easyfit-distribution-fitting.html>.

12. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.