



# Матрицы пространственных характеристик для возобновляемой энергетики

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-48-233019 (p\_мол\_a).

Рецензия эксперта на статью получена 08.12.2020 [Expert review on the article received on December 8, 2020].

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории Краснодарского края способно сократить потребление традиционного топлива и количество вредных выбросов от его сжигания, повысить энергонезависимость и энергетическую безопасность региона. Однако размещение объектов возобновляемой энергетики является сложным и многоуровневым процессом, при котором оцениваются множество различных критериев, прежде чем сделать вывод о пригодности и экономической целесообразности использования того или иного вида источника энергоснабжения.

Для уменьшения затрат на проведение анализа пригодности территории для размещения объектов возобновляемой энергетики и проведения предварительной оценки их экономической эффективности необходимо создать простой в использовании программный продукт, основанный на алгоритме поиска оптимальных решений, в основу которого положены матрицы пространственных характеристик потенциала ВИЭ, климатических и иных параметров местности, а также технико-экономические характеристики установок, использующих возобновляемую энергию.

Матрицы пространственных характеристик позволяют решить задачу поиска

ка исходных данных для оценки эффективности использования ВИЭ на той или иной территории Краснодарского края, позволяя взять готовое значение необходимых параметров, таких, например, как потенциал различных видов ВИЭ для каждой выбранной для оценки территории, что значительно упрощает расчёты и сокращает время на их проведение.

Для выбора характеристик, для которых составляются матрицы, необходимые для оценки эффективности размещения объектов возобновляемой энергетики, рассмотрим расчёт мощности и количества вырабатываемой энергии для установок возобновляемой энергетики.

**Для уменьшения затрат на проведение анализа пригодности территории для размещения объектов ВИЭ и проведения предварительной оценки их экономической эффективности необходимо создать простое в использовании ПО, основанное на алгоритме поиска оптимальных решений, в основу которого положены матрицы пространственных характеристик потенциала ВИЭ**

УДК 620.92. Номер научной специальности: 05.14.08.

## Матрицы пространственных характеристик для возобновляемой энергетики

**А. С. Кириченко**, к.т.н., доцент, кафедра электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии (ЭТиВИЭ); **Е. В. Кириченко**, преподаватель, кафедра государственного и международного права (ГиМП), Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина (КубГАУ, г. Краснодар)

Рассмотрены критерии, влияющие на выбор оптимального варианта размещения объектов возобновляемой энергетики, исходя из методики расчёта мощности и количества вырабатываемой энергии. Показаны критерии окружающей среды и особенности расчёта матрицы пространственных данных для них. Приведён алгоритм создания матриц пространственных данных для ресурсов возобновляемой энергии. Сделан вывод о возможности компьютерного моделирования климатических и геологических критериев окружающей среды для Краснодарского края.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, пространственные данные, критерии окружающей среды, энергетика, солнечная радиация, геотермальные ресурсы, ветроэнергетика.

UDC 620.92. The number of scientific specialty: 05.14.08.

## Spatial characteristics matrices for renewable energy

**A. S. Kirichenko**, PhD, Associate Professor, the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Renewable Energy Sources (ET&RES); **E. V. Kirichenko**, lecturer, the Department of State and International Law (D&IL), Trubilin Kuban State Agrarian University (Krasnodar city)

The criteria influencing the choice of the optimal variant of the location of renewable energy facilities are considered, based on the methodology for calculating the power and the amount of generated energy. The criteria of the environment and the features of calculating the spatial data matrix for them are shown. An algorithm for creating spatial data matrices for renewable resources is presented. The conclusion is made about the possibility of computer modeling of climatic and geological environmental criteria for the Krasnodar Territory.

**Key words:** renewable energy sources, spatial data, environmental criteria, energy, solar radiation, geothermal resources, wind energy.

Начнём с выражения выработки электрической энергии солнечной фотоэлектрической установки в  $i$ -м месяце:

$$W_i = W_{\text{вал}} F_{\text{см}} m \eta_{\text{к}} \times [1 - \eta_{\text{расч}}(t - t_0)/120] \eta_{\Delta P}^m \eta_{\Delta \Sigma}^m, \quad (1)$$

где  $W_{\text{вал}}$  — валовой удельный приход солнечной радиации на рассматриваемую площадку, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $m$  — количество модулей в солнечной батарее;  $\eta_{\text{к}}$  — КПД кремниевого солнечного элемента;  $t$  — температура окружающей среды для заданного месяца, °C;  $t = 25^\circ\text{C}$  — стандартная температура солнечного элемента;  $\eta_{\text{расч}}$  — коэффициент полезного действия солнечного элемента для расчётных условий;  $\eta_{\Delta P}^m$  и  $\eta_{\Delta \Sigma}^m$  — соответственно, потери мощности, определяемые последовательным соединением элементов и передачей энергии до потребителя.

Мощность солнечной фотоэлектрической электростанции для  $i$ -го месяца рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{фэ}} = E_{\text{гi}} n F_{\text{г}} \eta_{\text{фэ}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{гi}}$  — среднеемесячное значение облучённости солнечного элемента для  $i$ -го месяца, Вт/м<sup>2</sup>;  $n$  — число солнечных элементов;  $F_{\text{г}}$  — площадь солнечного элемента, м;  $\eta_{\text{фэ}}$  — КПД кремниевое преобразователя,  $\eta_{\text{фэ}} = 0,14$ .

Таким образом, для определения энергетических параметров солнечной фотоэлектрической установки необходимо установить значения следующих критериев окружающей среды: средняя температура окружающей среды по месяцам, валовой удельный приход солнечной энергии по месяцам и среднесуточная облучённость горизонтальной площадкой по месяцам.



Следующим определим среднеемесячное количество тепла, получаемое приёмником солнечной тепловой электростанции башенного типа через гелиостаты за один час  $i$ -го месяца:

$$Q_{\text{пр}} = E_{\text{гi}} n R_{\text{отр}} A_{\text{полл}}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{отр}}$  — коэффициент отражения гелиостата;  $A_{\text{полл}}$  — коэффициент поглощения приёмника.

Средняя мощность солнечной электростанции башенного типа для  $i$ -го месяца года:

$$N_{\text{баш}} = Q_{\text{пр}} \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{oi}}$  — относительный внутренний КПД турбины;  $\eta_{\text{oi}} = 0,85$ ;  $\eta_{\text{м}}$  и  $\eta_{\text{г}}$  — механический КПД и КПД электрогенератора,  $\eta_{\text{м}} = 0,975$ ,  $\eta_{\text{г}} = 0,985$ , соответственно.

Для солнечной тепловой электростанции важны те же критерии, что и для фотоэлектрической, таким образом, будем

рассматривать оба вида солнечных энергоустановок вместе.

Количество энергии, которая может быть выработано ветроустановкой для каждого месяца с удельной ометаемой площади с учётом повторяемости скоростей для заданного района, определяется по следующей формуле:

$$W_{\text{уд}}^{\text{м}} = \beta \tau \sum_{v_{\text{max}}}^v (v_i^3 t^*) + v_{\text{р}}^3 \sum_{v_{\text{max}}}^v (t^*), \quad (5)$$

где  $\beta$  — коэффициент, учитывающий характеристики ветра,  $\beta = 2 \times 10^{-4}$ ;  $\tau$  — число часов работы ветроустановки (ВЭУ) в месяце, ч;  $v_i$  — средняя скорость в градации, м/с;  $v_{\text{р}}$  — рабочая скорость ВЭУ, м/с;  $v_{\text{max}}$  — максимальная скорость ВЭУ, м/с;  $v_{\text{min}}$  — минимальная скорость ветроустановки, м/с;  $t^*$  — повторяемость скорости ветра для данной градации.

Удельная мощность ветроустановки при рабочей скорости ветра:

$$N_{\text{бет}} = \xi \rho_{\text{возд}} 0,5 (\pi d^2) 0,5 v_{\text{р}}^3, \quad (6)$$

где  $\xi$  — коэффициент использования ветра;  $\rho_{\text{возд}}$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  — диаметр ветроколеса, м.

Как видно из формул (5) и (6), для определения эффективности размещения ветровой электростанции необходимо учитывать скорость и повторяемость скоростей для заданного района, а также среднюю температуру по месяцам, так как от неё напрямую зависит плотность воздуха.

Количество тепла, получаемое из скважины для работы гидротермальных тепловых электростанций (ГеоТЭС):

$$Q_{\text{гт}} = G \rho_{\text{вод}} C (t_{\text{г}} - t_{\text{х}}) / 3600, \quad (7)$$

где  $G$  — дебет скважины, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho_{\text{вод}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — теплоёмкость воды, кДж/(кг·K);  $t_{\text{г}}$  и  $t_{\text{х}}$  — температура воды из скважины и после отбора теплоты, соответственно, K.



Мощность геотермальной теплоэлектростанции:

$$N_{\text{Гео}} = Q_{\text{ГТ}} \eta_{\text{ог}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}}. \quad (8)$$

Таким образом, для гидротермальной ГеоТЭС основными являются температура воды и дебет геотермальной скважины.

Количество тепловой энергии, получаемое от сжигания биогаза, полученного за час, при переработке навоза сельскохозяйственных животных:

$$Q_{\text{био}} = (1/3600) K (M_{\text{сут}}/24) \times n [(1 - W) P q_{\text{био}} - (c/\eta)(t_6 - t_3)], \quad (9)$$

где  $C$  — средняя теплоёмкость загружаемой биомассы, кДж/(кг·°K);  $t_6$  — температура процесса брожения, °K;  $t_3$  — температура загружаемой массы, °K;  $\eta$  — КПД процесса;  $K$  — коэффициент, учитывающий наличие подстилки в установке;  $M_{\text{сут}}$  — суточный выход навоза в зависимости от вида животных, кг/сут.;  $n$  — количество голов;  $P$  — доля сухого органического вещества (СОВ) в сухом веществе навоза;  $q_{\text{био}}$  — теплотворная способность биогаза, кДж/м³.

Мощность биогазовой теплоэлектростанции:

$$N_{\text{био}} = Q_{\text{био}} \eta_{\text{ог}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}}. \quad (10)$$

Из формул (10) и (11) видно, что для биогазовой установки важным критерием окружающей среды является только температура.

Таким образом, четыре из необходимых для определения оптимально положения объектов возобновляемой энергетики критериев являются климатическими, а два — геологическими, и все они привязаны к географическому положению и, соответственно, могут быть представлены в виде матрицы пространственных характеристик.

Для получения климатических данных могут использоваться климатические справочники [1, 2], компьютерные базы данных [3] и геоинформационные системы (ГИС) [4], климатические карты и атласы [5], а также расчёты [6].

Для составления матриц пространственных характеристик энергетических параметров возобновляемых источников энергии Краснодарского края могут быть использованы многолетние наблюдения за климатом, сбор и систематизацию которых в Краснодарском крае осуществляют 30 метеорологических станций [7], а также результаты, полученные в исследованиях В.В. Бутузова [8] и Е.А. Киселёвой и др. [9].

Для получения данных о температуре и дебете геотермальных вод Краснодарского края могут быть использованы карты геотермальных ресурсов Краснодарского края [10].



Климатические справочники и бумажные карты ресурсов ВИЭ всё ещё являются основным источником климатических данных, однако большинство из них не корректировались в течение десятков лет. Компьютерные базы данных и электронные карты энергетических ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, российская ГИС ВИЭ [11] или американская NASA SSE [12], имеют слишком большой масштаб (1°×1°), что составляет 1,23 млн га.

Таким образом, на всей площади Краснодарского края будет всего девять полных квадратов, что не позволяет провести адекватный анализ эффективности размещения объектов возобновляемой энергетики. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, для построения матриц пространственных характеристик должны быть использованы данные метеорологических станций и данные, полученные для территории Краснодарского края местными учёными [8, 9].

Следует также отметить, что некоторые из приведённых источников климатических данных имеют интервал наблюдения четыре часа и более, а в ряде случаев величина интервала и вовсе не регулярна, что не позволяет их использовать для внутрисуточной оценки выработки энергии, и делать на их основании выводы о надёжности энергоснабжения, так

**Анализ данных осуществляется по алгоритму, предназначенному для построения матриц пространственных характеристик на основе данных о значениях параметров, влияющих на оценку эффективности размещения объектов возобновляемой энергетики. Для каждого такого параметра обязательно создаётся своя матрица пространственных характеристик**

как при таких интервалах не учитывается стохастический характер поступления солнечной радиации или ветрового ресурса. Устранение данного фактора требует проведения дополнительных метеорологических изысканий на территории Краснодарского края, направленных на уточнение и заполнение пробелов в существующих базах климатических данных. Однако для оценки среднемесячных значений мощности и выработки энергии от ВИЭ приведённые источники климатических данных достаточны, так как их интервал наблюдений значительно меньше, чем период, для которого производится расчёт.

Анализ данных осуществляется по алгоритму, предназначенному для построения матриц пространственных характеристик на основе данных о значениях параметров, влияющих на оценку эффективности размещения объектов возобновляемой энергетики. Для каждого такого параметра создаётся своя матрица пространственных характеристик.

#### Основные этапы алгоритма:

1. Получение исходных данных.
2. Привязка исходных данных к матрице пространственных характеристик по известным координатам.
3. Расчёт значений незаполненных ячеек матрицы пространственных характеристик.
  - 3.1. Если исходные данные — точки, то производится расчёт по методу «все точки в радиусе».
  - 3.2. Если исходные данные — изолинии, то производится расчёт незаполненных точек матрицы пространственных характеристик методом линейной интерполяции между двумя изолиниями.
4. Вывод матрицы пространственных характеристик.

В первом пункте алгоритма определяется, каким именно образом будут заданы исходные значения, если исходные данные представлены в виде данных метеорологических станций или таблицы,

то исходным видом будут точки, а если карты ресурсов, то исходными данными будут изолинии. Задаются исходные значения точек или изолиний, необходимые для расчёта. Во втором пункте происходит привязка ячеек матрицы к географическим координатам.

В третьем пункте осуществляется нахождение значений во всех точках матрицы пространственных характеристик. Так как для каждого параметра создаётся своя матрица пространственных характеристик, то и значение в ячейке матрицы определяется только одно, соответствующее значению выбранного параметра на территории Краснодарского края, соответствующее данной ячейке матрицы.

При использовании метода нахождения значения в ячейке матрицы «все точки в радиусе» применяется метод

пространственной нелинейной интерполяции [13, 14], при этом радиус поиска выбирается исходя из мощности компьютера, на котором происходит расчёт. Следует учитывать, что в радиусе поиска должны находиться как минимум две противоположные точки, между которыми можно построить отрезок, на котором также находится искомая точка, иначе высока вероятность получить недостоверный результат.

В случае, если исходные данные заданы изолиниями, расчёт производится методом интерполяции [14] между ближайшими точками на двух изолиниях, между которыми расположена искомая точка.

Представленный выше алгоритм может быть реализован при помощи компьютерного моделирования, что значительно уменьшит время расчёта.

## Заключение

Создание матриц пространственных характеристик энергетического потенциала возобновляемых источников энергии позволит в значительной степени облегчить процесс расчёта параметров объектов возобновляемой энергетики, что сделает использование альтернативных источников энергии доступным для простого человека.

Для расчёта энергетических характеристик достаточно получить информацию о температуре воздуха, поступающей солнечной радиации, скорости и повторяемости ветра, температуре и дебете геотермальных скважин. Для получения данных в каждой ячейке матрицы целесообразно использовать компьютерное моделирование. ●

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 3. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 724 с.
2. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 3. — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 332 с.
3. Бутузов В.А. Отечественные и зарубежные нормы и компьютерные базы данных для проектирования геологических объектов // Журнал СОК, 2017. № 3. С. 90–91.
4. Киселева С.В., Попель О.С., Фрид С.Е. Геоинформационные системы в области возобновляемой энергетики // Энергия: экономика, техника, экология, 2013. № 7. С. 2–13.
5. Попель О.С. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории Российской Федерации / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец и др. — М.: ОИВТ РАН, 2010. 86 с.
6. Бутузов В. А. Солнечная радиация: справочники и расчёты // Журнал СОК, 2017. № 1. С. 106–108.
7. Данные сети метеостанций Краснодарского ЦГМС [Электр. текст]. Краснодарский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: филиал ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС». Режим доступа: kubanmeteo.ru. Дата обращения: 15.12.2020.
8. Бутузов В.В. Повышение эффективности систем солнечного теплоснабжения: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.14.08. — Краснодар: КубГАУ; М.: ГИИ ВИАЭСХ, 2013.
9. Киселёва Е.А., Киселёв Е.Н., Погорелов А.В. Моделирование поля скорости ветра — возобновляемого источника энергии — на территории Краснодарского края // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2015. № 21. С. 266–273.
10. Бутузов В.А. Геотермия Краснодарского края: ресурсы, опыт использования, перспективы // Журнал СОК, 2019. № 4. С. 80–85.
11. Солнечная радиация на горизонтальную поверхность (годы) [Электр. текст]. ГИС ВИЭ России. Режим доступа: gisre.ru. Дата обращения: 15.12.2020.
12. Prediction of worldwide energy resources. NASA Power Data Access Viewer. Web-source: power.larc.nasa.gov. Дата обращения: 15.12.2020.
13. Осипов В.В. Анализ методов создания цифровых моделей поверхностей // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2011. № 2. С. 73–77.
14. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции данных метеорологии // Общество. Среда. Развитие, 2018. № 1. С. 144–151.

## REFERENCES

### Spatial characteristics matrices for renewable energy

**Anna S. Kirichenko**, PhD, Associate Professor, the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Renewable Energy Sources (ET&RES); **Evgeniy V. Kirichenko**, lecturer, the Department of State and International Law (D&IL), Trubilin Kuban State Agrarian University (Krasnodar city)

1. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Issue 13. Part 3. Leningrad. *Gidrometeoizdat* [Hydrometeorological Publishing House of Russia ("Hydrometeoizdat" Publishing House)]. 1990. 724 p. [In Russian]
2. *Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. Issue 13. Part 3. Leningrad. *Gidrometeoizdat* [Hydrometeorological Publishing House of Russia ("Hydrometeoizdat" Publishing House)]. 1967. 332 p. [In Russian]
3. V.A. Butuzov. *Otechestvennye i zarubezhnye normy i komp'yuternye bazy dannykh dlja projektirovaniya gelioustanovok* [Domestic and foreign standards and computer databases for the design of solar power plants]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2017. No. 3. Pp. 90–91. [In Russian]
4. S.V. Kiseleva, O.S. Popel', S.E. Frid. *Geoinformatsionnye sistemy v oblasti vozobnovlyajemoj jenergetiki* [Geographic information systems in the field of renewable energy]. *Jenergiya: jekonomika, tehnika, jekologija* ["Energy: economics, technology, ecology" Magazine]. 2013. No. 7. Pp. 2–13. [In Russian]
5. O.S. Popel', S.E. Frid, Ju.G. Kolomiciec et al. *Atlas resursov solnechnoj jenerгии na territorii Rossijskoj Federacii* [Atlas of solar energy resources in the Russian Federation]. Moscow. OIIVT RAN [Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences]. 2010. 86 p. [In Russian]
6. V.A. Butuzov. *Solnechnaja radiacija: spravochniki i raschety* [Solar radiation: reference books and calculations]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2017. No. 1. Pp. 106–108. [In Russian]
7. *Dannye seti meteostancij Krasnodarskogo CGMS* [Data from the network of meteorological stations of the Krasnodar Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. *Krasnodarskij centr po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy: filial*

- FGBU "Severo-Kavkazskoe UGMS" [Krasnodar Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring as branch of the Federal State Budgetary Institution "North Caucasus Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring"]. Web-source: kubanmeteo.ru. Access data: December 15, 2020. [In Russian]
8. V.V. Butuzov. *Povyshenie jeffektivnosti sistem solnechnogo teplosnabzhenija: Diss. kand. tehn. nauk po spec. 05.14.08* [Increasing the efficiency of solar heat supply systems. The dissertation of the candidate of technical sciences in specialty No. 05.14.08]. Krasnodar. *KubGAU* [Trubilin Kuban State Agrarian University]. Moscow. *GNU VijeSH* [State Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute for Electrification of Agriculture of the Russian Academy of Sciences]. 2013. [In Russian]
9. E.A. Kiseleva, E.N. Kiselev, A.V. Pogorelov. *Modelirovanie polja skorosti vetra — vozobnovljajemogo istochnika jenerгии — na territorii Krasnodarskogo kraja* [Modeling the wind speed field — a renewable energy source — in the Krasnodar region]. *InterKarto. InterGIS* ["InterKarto. InterGIS" Magazine]. 2015. No. 21. Pp. 266–273. [In Russian]
10. V.A. Butuzov. *Geotermija Krasnodarskogo kraja: resursy, opyt ispol'zovaniya, perspektivy* [Geothermy of Krasnodar region: resources, experience of use, prospects]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 4. Pp. 80–85. [In Russian]
11. *Solnechnaja radiacija na gorizonta'nuju poverhnost' (gody)* [Solar radiation on a horizontal surface (years)]. *GIS VIJe Rossii* [State Information System of Renewable Energy Sources of Russia]. Web-source: gisre.ru. Access data: December 15, 2020. [In Russian]
12. Prediction of worldwide energy resources. NASA Power Data Access Viewer. Web-source: power.larc.nasa.gov. Access data: December 15, 2020.
13. V.V. Osipov. *Analiz metodov sozdaniya cifrovych modelej poverhnostej* [Analysis of methods for creating digital surface models]. *Interjekspos Geo-Sibir* ["Interjekspos GEO-Siberia"]. 2011. No. 2. Pp. 73–77. [In Russian]
14. S.V. Krjukova, T.E. Simakina. *Ocenka metodov prostranstvennoj interpoljacii meteorologicheskikh dannykh* [Evaluation of methods for spatial interpolation of meteorological data]. *Obshhestvo. Sreda. Razvitie* ["Society. Wednesday. Development" Magazine]. 2018. No. 1. Pp. 144–151. [In Russian]