

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.55/551.8

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ДЛЯ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В НАХИЧЕВАНСКОЙ АР

Н.С. Имамвердиев

Институт географии Национальной академии наук Азербайджана, отдел экономической и политической географии, науч. сотр.; e-mail: imamverdiyev.nicat@gmail.com

Поскольку выходная мощность электрической энергии, производимой преобразованием солнечного излучения с помощью фотоэлементов невелика, для более эффективного производства энергии необходимо определить области с высоким солнечным излучением. Однако, из-за низкого КПД фотоэлектрических панелей (14–18%) и малой интенсивности суммарного солнечного излучения на горизонтальную поверхность для достижения определенного уровня мощности требуются большие площади установки. Из-за первоначальной высокой стоимости установки солнечных электростанций для выбора наиболее подходящего места требуется всесторонняя систематическая оценка географических факторов региона. Поэтому в качестве района исследования была выбрана Нахичеванская АР, где уровень радиации выше, чем в других регионах Азербайджана (1220–1699 кВтч/м²·год), а годовая продолжительность солнечного сияния составляет более 2500 часов. Поскольку создание солнечных электростанций в регионах с высокими значениями солнечной радиации в основном зависит от технических, экономических и экологических факторов, районы, соответствующие высоким критериям в модели, были тщательно исследованы в результате сбалансированного сравнения для определения подходящих мест установки солнечных электростанций. Для этого была использована модель аналитической иерархии процессов (АИП), основанная на методах многокритериального принятия решений (МПР). На первом этапе исследования были проанализированы семь критериев определения подходящих мест: значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, место уклона, землепользование, буферное расстояние от районов с высоким годовым потенциалом солнечной энергии до жилых районов, близость к подстанциям, автомагистралям и линиям электропередачи. На втором этапе уровень доступности пригодности областей в рамках определенных критериев в географических информационных системах (ГИС) определялся с помощью инструмента «Взвешенное наложение» (Weighted Overlay). В результате исследования был сделан вывод, что 9,5% (510 км²) земель Нахичеванской АР имеют высокую пригодность для размещения солнечных электростанций, 12% (645 км²) земель – среднюю и 24% (1290 км²) – низкую. Остальные области (54,5%, или 2930 км²) относятся к территориям, которые не подходят для использования из-за низкой радиации, высокого уклона, наличия охраняемой территории, населенных пунктов, сельскохозяйственных территорий и слабо развитой инфраструктуры. Оптимальные места охватывают в основном южную и восточную части региона.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, геоинформационная система, модель аналитической иерархии процесса

ВВЕДЕНИЕ

Выбор географически подходящего места для эффективного производства энергии на фотоэлектрических солнечных электростанциях зависит от многих факторов. Для выявления конкретного результата можно получить более реалистичные цифры, изучив пространственные и метеорологические данные региона в географических информационных системах (ГИС) [Khan, Rathi, 2014]. В Нахичеванской АР количество солнечных дней составляет около 250, а средний уровень радиации составляет – 1460 кВтч/м² в год, что делает эту территорию подходящей для инвестиций в установки панелей

солнечной энергии [Mammadov, 2013]. Поэтому с точки зрения энергетической безопасности региона необходимо определить подходящие участки для использования солнечной энергии с низкой себестоимостью и максимальной выгодой. В исследовании использовалась многокритериальная методика принятия решений для определения пригодности территорий. Такой подход является лучшим методом идентификации для анализа сложных и многоформатных данных, полученных для достижения конкретной цели [Wang et al., 2018]. Использование пространственной ГИС и многокритериального метода в форме интеграции могут помочь в углублен-

ном анализе естественных событий, рациональной и систематической идентификации и интерпретации различных уровней риска [Linkov, Moberg, 2011].

Модели аналитической иерархии процесса на основе МПР используются для связывания данных, полученных в результате анализа, для определения соответствующих регионов. Конечная цель метода аналитического иерархического процесса – найти альтернативный способ достижения общего результата путем анализа собранных данных с точки зрения множества критериев и противоречивых целей [Uyan, 2013]. Основная цель – определение зоны со средним и высоким энергетическим потенциалом в соответствии с принципами выбора площадок солнечных электростанций. Что касается экономного и эффективного производства электроэнергии, то на этапе планирования места установки электростанции учитываются годовая продолжительность солнечного сияния в регионе, уровень радиации, землепользование, эффективность сельского хозяйства, расстояние до дорог, линий электропередачи и другие ограничения. В то же время объекты, загрязняющие поверхность фотоэлектрических панелей и создающие теневые эффекты, входят в число критериев, непосредственно влияющих на выработку энергии [Vulkan et al., 2018].

Поскольку в каждой стране своя уникальная природная среда, то существует множество примеров использования многокритериальных методов на основе ГИС для определения наиболее оптимальных местоположений [Beccali et al., 2003]. Например, в исследовании по определению подходящей территории для создания солнечной электростанции в Иране были приняты во внимание 11 критериев [Noorollahi et al., 2016]. Поскольку превосходство этих критериев друг над другом неясно, для взвешивания была использована модель процесса аналитической иерархии и создана карта пригодности территорий для размещения солнечных электростанций в среде ГИС. Например, в исследовании, проведенном в Саудовской Аравии с использованием методов аналитического иерархического процесса, исследователь [Al Garni, Awasthi, 2017] пришел к выводу, что северные и северо-западные регионы страны являются наиболее подходящими для солнечных электростанций. Этот метод сыграл решающую роль в определении оптимальной площади в соответствии с принципами размещения фотоэлектрических установок на определенном расстоянии от ограничительной зоны, такой как сельскохозяйственные районы, охраняемые природные территории, жилые районы. Исследование по определению подходящего района в провинции Хузестан (Иран) показало, что даже при наихудшем сценарии потенциал производства солнечной энергии в

2016 г. примерно в 1,75 раза превышал общий объем электроэнергии, производимой в Иране. Здесь с широким использованием солнечных электростанций затраты на установку и инфраструктуру будут амортизированы, а общая стоимость производства электрической энергии по сравнению с ископаемым топливом снизится [Asakereh et al., 2017]. В другом исследовании были определены четыре основных критерия (радиация, топография, технико-экономический и экологический) и восемь подкритериев для планируемых солнечных электростанций в Восточном Марокко, была создана карта пригодности потенциальных регионов. В результате исследования определено, что 19% восточной части Марокко вполне подходит для установки солнечных электростанций [Merrouni et al., 2018].

Кроме того, есть несколько примеров оценки различных альтернативных источников энергии с использованием комбинации различных методов, основанных на принятии многокритериальных решений для оценки больших территорий. Была применена модель ELECTRE, которая включает многокритериальный метод принятия решений, используемый для оценки плана действий по исследованию технологий возобновляемой энергии в региональном масштабе. Например, на острове Сардиния было предложено три сценария принятия решений, каждый из которых представляет собой согласованную последовательность действий на основе разработки стратегий по раскрытию преимуществ и недостатков использования возобновляемых источников энергии [Beccali et al., 2003; Devi, Yadav, 2013]. Тем не менее потенциал источников геотермальной энергии на острове Хиос (Греция) был оценен путем взаимного сравнения методов PROMETHEE II и ELECTRE III [Polatidis et al., 2015]. В соответствии с различными критериями устойчивости для планирования и моделирования возобновляемых источников энергии в Колумбии был предложен метод под названием MODERGIS [Quijano et al., 2010]. С помощью этого метода зона исследования сначала была классифицирована в соответствии с потенциалом солнечной энергии, затем были проанализированы параметры окружающей среды и определены подходящие площади для крупных фотоэлектрических установок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные цифровой модели рельефа (ЦМР) исследуемой области были получены со спутника ALOS-PALSAR с открытым исходным кодом для расчета и картирования значений рельефа, уклона и радиации в среде ГИС. Кроме того, использовались климатические данные с 1990 по 2018 г., данные глобально-

го солнечного атласа (ГСА) и, для определения значений радиации в г. Нахичевани, соответствующие метеорологические карты.

В литературе есть несколько исследований модели аналитической иерархии процесса (АИП), включенной в методику принятия многокритериальных решений (МПР), которая основана на интеграции с системами ГИС при выборе места для строительства солнечных электростанций. В этих исследованиях есть различные критерии, определяющие выбор подходящего места. Это связано с тем, что, когда применяются те же критерии, точность полученных цифр не отражает истину, поскольку рабочие зоны имеют свои характеристики с точки зрения таких условий, как топография, радиация, землепользование и инфраструктура. Таким образом, в соответствии с принципами установки солнечной энергии были определены основные критерии, связанные с рельефом, климатическими и экологическими характеристиками территории. Данные, собранные для этой цели, были сгруппированы в три класса от высокой до низкой пригодности по следующим критериям:

- пространственные: высота, уклон, тень холма;
- климат: суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, температура воздуха;
- окружающая среда: землепользование, охраняемые территории;
- инфраструктура: дороги и линии электропередачи.

Все данные, сгенерированные для создания подходящего места в ГИС, были взвешены как 100% в таблице влияния с помощью последовательных инструментов «Функция в растр», «Евклидово расстояние», «Переклассификация», «Взвешенное наложение» в инструменте модели Overlay. Кроме того, в исследовании также использовались методы математики, статистического, картографического и географического моделирования.

Помимо этого, есть и другие важные факторы, которые следует учитывать при планировании установки солнечной электростанции в любом районе, а именно:

- текущий спрос на электроэнергию в регионе и динамика количественного роста этого спроса в ближайшие годы;
- потенциал ресурсов солнечной энергии в регионе и его доля в общем спросе на энергию, а также возможность использования его в условиях конкуренции с традиционной энергией;
- экономическая эффективность и экологическое преимущество источников солнечной энергии.

Хотя суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, которая является основным требованием при выборе оптимальной площади для

строительства солнечной станции, высока, площади, соответствующие ограничительным критериям, считаются непригодными. Такие непригодные места представляют собой естественные формы рельефа, которые не подходят для строительства солнечных электростанций из-за неблагоприятного уклона (горные хребты и холмы), значительного затенения или ограниченного пространства (каньоны). К этой группе относятся национальные границы с зонами особого назначения, охраняемыми прибрежными зонами и территориями по периметру не менее 1 км, для которых установлен особый режим использования и защиты. В то же время природные заповедники (национальные парки, заповедники, природа и ландшафты) и объекты культурного наследия (археологические памятники, исторические поселения и др.) также входят в число ограничительных критериев. Обычно отмечается, что оптимальное значение набора критериев не противоречит оптимальному выбору других критериев. В случае «противоречия» между одним параметром и другим учитывается принцип «соответствия критериев с наименьшим ущербом» [Gardashov et al., 2020]. Например, в районе с высоким солнечным потенциалом (т. е. с небольшой или отсутствующей горной тенью, меньшей облачностью, загрязненностью и туманом) подходящее местоположение определяется с учетом дополнительных затрат на инфраструктуру и возможной эффективностью производства. Окончательное решение выбора наиболее подходящего места определяется по результатам расчетов, произведенных по указанной методике с учетом показателей всех параметров. Определение площади для установки солнечных электростанций в основном зависит от следующего:

- генерирующая мощность солнечных электростанций должна быть высокоэффективной (эффективность фотоэлектрических панелей), а инвестиционные затраты экономичными (долгосрочные контракты, гарантированные закупки и т. д.);
- оптимальный азимут и наклон солнечных панелей должны находиться в положении, соответствующем минимальному эффекту затенения;
- наиболее подходящее место должно находиться в кратчайшем расстоянии от линий электропередачи, автомагистралей и точки потребления электроэнергии;
- общий горизонтальный потенциал солнечной энергии в регионе должен быть высоким.

В целом выбор подходящего места для установки фотоэлектрической станции основывается на четырех основных критериях:

- 1) экономический: цена тарифа на солнечную энергию, стимулирующие факторы, стоимость отвода земли и затраты на установку электростанции;

2) метеорологический и технический: солнечный свет, солнечная радиация, эффективность производства энергии фотоэлектрическими панелями и оптимальная ориентация, азимут и наклон панелей к солнцу;

3) географический: направление южного склона, неплодородная почва, климатические условия, ограниченность территорий (заповедник, горы, заболоченные земли и т. п.);

4) социальный: потребность жилых районов в электроэнергии, дополнительные рабочие места и доступ к чистым и бесплатным энергоресурсам.

Перечисленные выше подкритерии, касающиеся использования солнечной энергии, включающие экономические, технические, метеорологические,

географические и социальные условия региона, обсуждаются отдельно. На основе метода МПР эти критерии были оценены с использованием пространственных данных и блок-схемы АИП, был создан набор формул и решений. Кроме того, модель АИП была применена для объяснения проблем в методологии исследования (рис. 1) и для анализа соответствующих критериев. В ходе исследования была создана пара матриц на основе множественных сравнений между измерениями, а затем, оценив уровень важности того или иного критерия, были разработаны первичные критерии для определения оптимальных областей. Для оценки противоречивых решений в процессе попарного сравнения использовался коэффициент согласованности (КС).

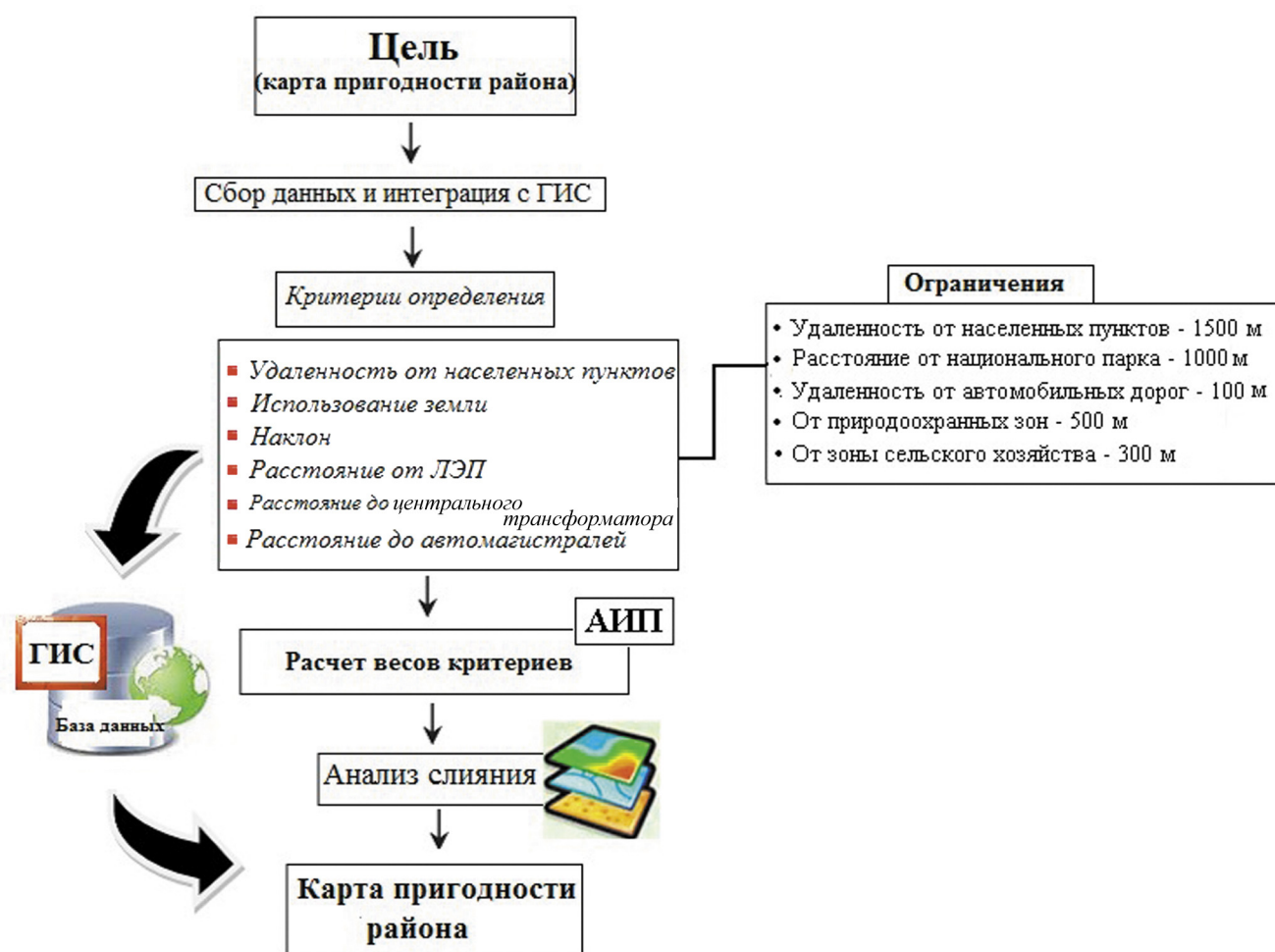


Рис. 1. Общая методика исследования [Uyan, 2013]

Fig. 1. General research methodology [Uyan, 2013]

Метод АИП, используемый в исследовании, является одним из наиболее полных методов MCDM для определения альтернатив путем представления коэффициента решения для достижения различных целей. Это позволяет генерировать комбинацию качественных и количественных входных

данных, которые обеспечивают оптимальный подход к работе со сложными вариантами МПР при диверсификации источников энергии и определении подходящего места установки. Если лицо, принимающее решение (ПР), видит несоответствие в результатах, то с помощью метода АИП

можно будет найти решение, объясняющее это несоответствие. Кроме того, исследования методом МПР являются одними из наиболее применяемых методов объединения модели АИП со многими подходами поддержки выбора (рис. 2). Модель АИП зарекомендовала себя как доступная техника МПР для упрощения исследований, ориентированных на результат, и для принятия решений по сложным вопросам [Effat, 2013; Watson, 2015].

Первый уровень иерархии АИП устанавливает основную цель, тогда как средний и нижний уровни показывают принципы выбора и альтернативы по отдельности. Лица, принимающие решения, оценивают каждый стандартный критерий в парных корреляциях со своей базой данных. В результате он разделяет критерии на более мелкие подуровни и взвешивает их в соответствии с принципами выбора установки.

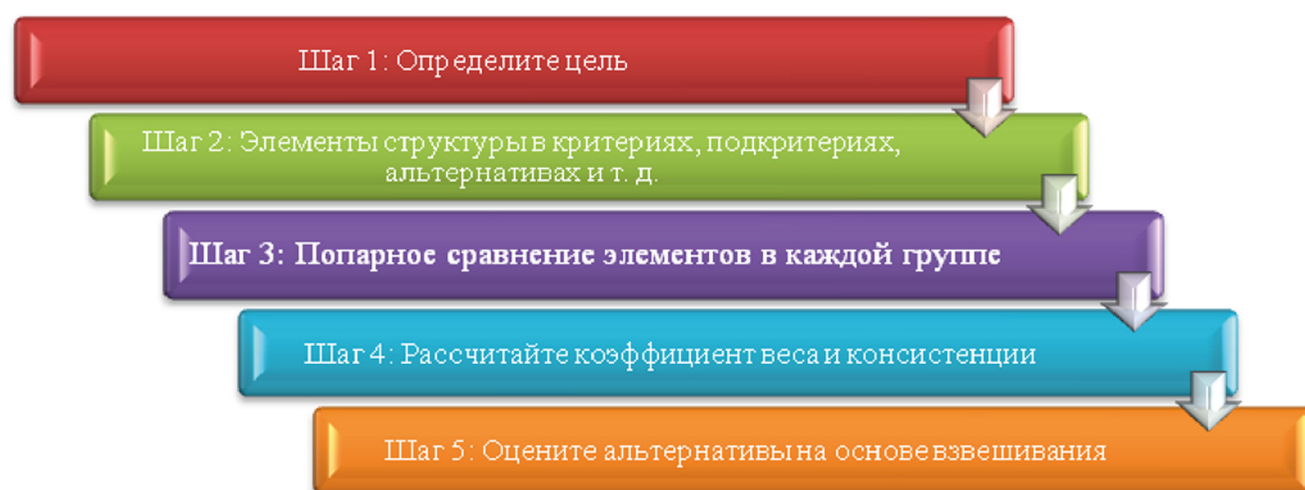


Рис. 2. Блок-схема процесса аналитической иерархии

Fig. 2. Flowchart of the Analytical Hierarchy Process

Для определения наиболее подходящего места расположения станции в исследовании оценивались четыре критерия: солнечная радиация (рис. 3), уклон (рис. 4), землепользование, удаленность от дорог, линий электропередачи и населенных пунктов (рис. 5). Затем путем сравнения этих критериев попарно была создана матрица решений. По методу АИП весовые значения каждого критерия получились расчетами по сложным уравнениям. Затем определялся коэффициент согласованности, чтобы исключить противоречивые решения во время исследований парных сравнений. Для выполнения метода АИП определялись значения n критериев и применялись формулы в определенной последовательности [Saaty, 1980]. Определение коэффициента согласованности проводилось с помощью метода АИП в шесть шагов: 1) постановка задачи; 2) создание матрицы сравнения; 3) нормализация; 4) взятие вектора приоритета; 5) тесты на согласованность; 6) выбор или упорядочение (см. рис. 2). Очередность выбора подходящих участков определялась по приоритетности: солнечной радиации, землепользования, расстояния до дорог и линий электропередачи, уклона.

Сначала критерии сравнивались между собой по уравнению, разработанному в [Saaty, 1980]. Оценка предпочтения для i - и j -критерия определяется с использованием представленной шкалы девяти целых значений A_{ij} для создания матрицы парных сравнений с различными критериями $m = (n \times n)$. A_{ij} обозначает запись в i -й строке и j -м столбце матрицы m в таблице 1.

Записи оценки предпочтения A_{ij} и A_{ji} должны обеспечивать следующее ограничение в уравнении (1): матрица сравнения – квадратная матрица размером $n \times n$. Ее компоненты на диагонали принимают значение 1.

Матрица парных сравнений

$$A_n \times n = a_{ij}A = \begin{bmatrix} 1 & A_1 & A_2 & A_3 & \cdots & A_n \\ A_1 & 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ A_2 & a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ A_3 & a_{31} & a_{31} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

здесь $a_{ij} = 1/A_{ji}$ ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$), общее $n(n+1)/2$, здесь $n=1$, индукция, предположим, истина $n=A$, $1+2+3+\dots+A=(A+1)/2$, показать истину $n=A+1$,

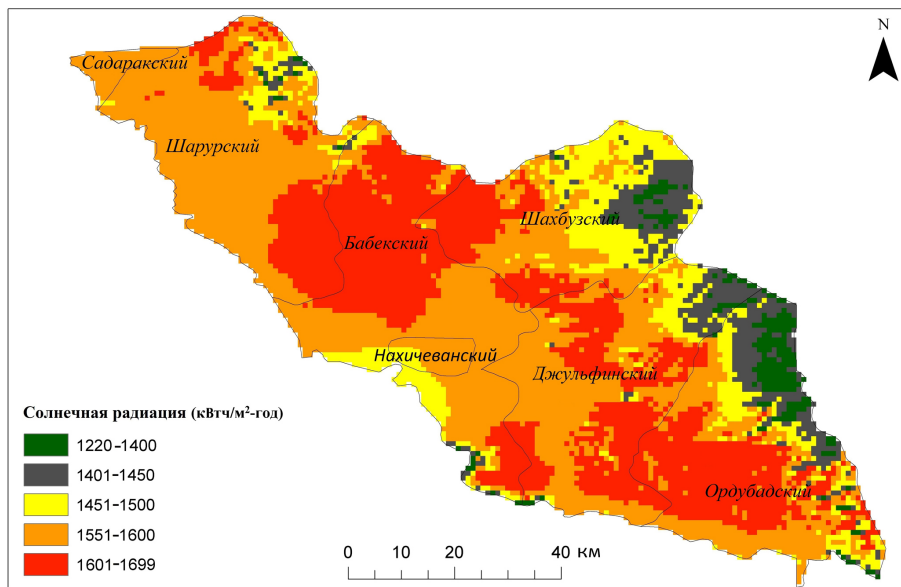


Рис. 3. Долгосрочный средний (1999–2018) годовой суммарный ИГД Нахичеванской АР, кВтч/(м² в год) [Global Solar Atlas..., 2020; Solargis..., 2020]

Fig. 3. Long-term average (1999–2018) annual total GHI of the Nakhchivan AR [GSA..., 2020; Solargis..., 2020]

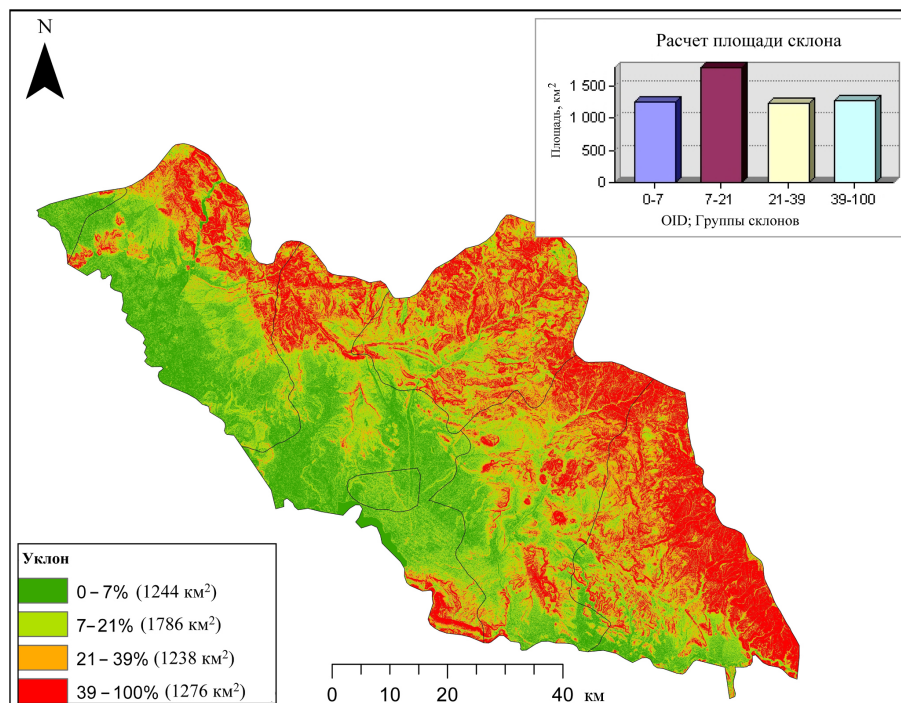


Рис. 4. Карта уклонов Нахичеванской АР [Earth Data Search..., 2020]

Fig. 4. Map of slopes of the Nakhchivan Autonomous Republic [Earth Data Search..., 2020]

$$1+2+3+\dots+A+A+1=\frac{(A+1)(A+1+1)}{2},$$

$$\frac{A(A+1)}{2}+\frac{2(A+1)}{2}=\frac{(A+1)(A+2)}{2},$$

$$A(A+1)+2(A+1)=(A+1)(A+2),$$

$$A^2+A+2A+2=A^2+2A+A+2.$$

Каждый столбец равен 1, чтобы сформировать нормализованную матрицу парных сравнений m . Кроме того, для каждого элемента матрицы в таблице 2 величину $\bar{A}_{ij}$ можно получить по уравнению

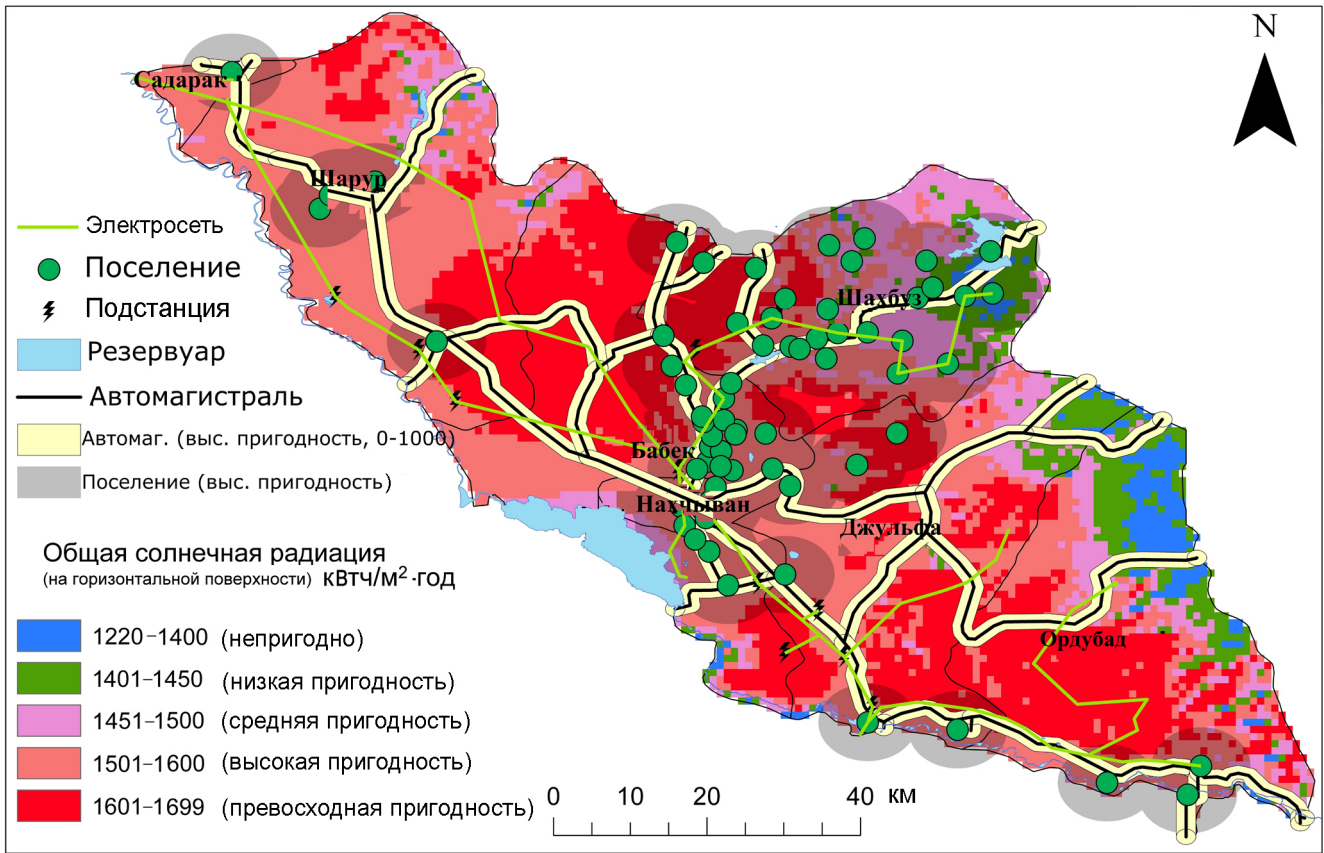


Рис. 5. Карта выбора места установки солнечной электростанции

Fig. 5. Suitability map for choosing a solar power plant installation site

Таблица 1

Значения сравнения, выполненные в АИП, и их интерпретации

Числовые значения A_{ij}	Числовые значения A_{ji}	Уровень значимости	Определение
1	1	Одинаково важно	Критерии i и j одинаково важны
3	1/3	Немного важно	Критерий i немного важнее j
5	1/5	Важный	Критерий i умеренно важнее j
7	1/7	Очень важно	Критерий i значительно важнее j
9	1/9	Чрезвычайно важно	Критерий i чрезвычайно важнее j
2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6	Промежуточные значения	

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}}. \tag{2}$$

На третьем этапе получают средние значения между строками для определения соответствующих уровней значимости с использованием уравнения вектора приоритета

$$W_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{n}. \tag{3}$$

Относительный вес каждого критерия находится в диапазоне 0–1. Кроме того, из-за изучения весо-

вых значений критерия оказалось, что коэффициент прямого нормального излучения оказывает большее влияние на площадь солнечной фотоэлектрической установки. Вектор приоритета выглядит следующим образом (табл. 3).

На четвертом этапе для создания карты подходящих мест для установки солнечных фотоэлектрических систем путем изучения каждого критерия применяется уравнение (4). В противном случае карту пригодности можно получить, найдя сумму значений каждого критерия (x_i), умноженную на его вес (w_i) (табл. 4).

$$SM = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \cdot r, \text{ где } r \in \{0, 1\}. \tag{4}$$

Таблица 2

Матрица сравнения критериев принятия решения

Критерии	Солнечная радиация (А)	Землепользование (Б)	Расстояние до дорог и линий электропередачи (В)	Уклон (Г)
Солнечная радиация (А)	1	7	5	1/4
Землепользование (Б)	1/7	1	1/2	1/7
Расстояние до дорог и ЛЭП (В)	1/5	2	1	1/9
Уклон (Г)	4	7	9	1
Общее	5,34	17	15,5	1,50

Таблица 3

Матрица нормализации A_{ij}

Критерий	А	Б	В	Г	Нормализованный вектор приоритета W_i	Окончательный вес, %
А	0,187	0,412	0,323	0,166	0,272	28
Б	0,027	0,059	0,032	0,095	0,053	5
В	0,037	0,118	0,065	0,074	0,073	8
Г	0,749	0,412	0,581	0,665	0,584	59

Таблица 4

Вектор веса и приоритета по критериям

Критерий	Вес	Приоритет
А	0,272	2
Б	0,053	4
В	0,073	3
Г	0,601	1

Таблица 5

Определение среднего значения $\lambda_{\max}$

Aw	Aw/W	Среднее $\lambda_{\max}$
1,162	$1,162/0,272 = 4,271$	4,234
0,215	$0,215/0,053 = 4,035$	
0,301	$0,301/0,073 = 4,102$	
2,722	$2,722/0,601 = 4,525$	

На пятом этапе расчет CR проводится по уравнению (5). Коэффициент согласованности получается путем деления индекса согласованности (CI) на случайный индекс (RI), который изменяется в зависимости от количества критериев. Поскольку количество критериев в исследовании равно 4, случайный показатель, равный этому значению, соответствует 0,90. Для определения значения индекса согласованности основных критериев находится максимальное собственное значение матрицы сравнения ($\lambda_{\max}$) (табл. 5).

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad 345 \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad Aw = \lambda_{\max} w. \quad (5)$$

Таким образом, $CI = (4,234 - 4)/(4 - 1) = 0,078$; $CR = 0,078/0,90 = 0,086\%$.

Для расчета значимости критерия при определении пригодности районов размещения солнечных станций была создана бинарная матрица сравнения, как показано в таблице 3, рассчитан собственный вектор, показывающий единицу приоритета каждого критерия, а сумма всех весов была равна

единице. CR рассчитывали для проверки взвешенных значений каждого критерия ($CR = 0,086$). Поскольку он меньше 0,10, такое решение считается приемлемым. При этом есть возможность оценить альтернативы, возникающие, когда значения критерия, сложенные с анализом чувствительности с помощью основного сетевого инструмента в приложении «Суперрешения 3.2», колеблются в пределах 0,1–1 в зависимости от назначения. Четыре района с высокими значениями солнечной радиации для установки солнечных электростанций по всей Нахичеванской АР, выделенные методом АИП (Шарур, Бабек, Джульфа и Ордубад), оценивались как альтернативы друг другу. При выборе подходящих площадок для солнечных электростанций основные критерии от высокого до низкого уровня важности взвешивались в соответствии с общим горизонтальным излучением, землепользованием, уклоном и расстоянием до дорог и линий электропередачи. В последующем Бабекский район с расчетом матрицы попарного сравнения данных под критерии, такие как излучение на горизонтальной поверхно-

сти (1400–1699 кВтч/м²), землепользование (плодородные почвы, бесплодные земли), уклон (1–4°) и расстояние (от 1000 до 5000 м) был определен как наиболее подходящее место.

При выборе расположения фотоэлектрических панелей с использованием инструмента взвешенного перекрытия в ГИС рассматриваемые критерии (полученные из модели АНР) в сочетании с их соответствующими уровнями значимости учитывались в три этапа:

1) поскольку входные слои имеют разные значения и диапазоны, каждый критерий масштабировался, чтобы его можно было интегрировать в один слой. Затем значения входных карт были классифицированы по общей шкале предпочтений от 1 до 10 (10 – наиболее подходящий вариант);

2) каждый уровень критерия умножался на вес или значимость критерия, касающегося АНР;

3) полученные значения ячеек складывались друг с другом, чтобы сформировать окончательный составной слой. В результате были определены подходящие области.

Для этого в приложении ArcGIS 10.8 была создана база данных, имеющая широкий набор инструментов пространственного анализа, а также были проанализированы и систематизированы данные о суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности в регионе. Затем по предложенной методике МПР в районах с солнечным потенциалом определялись наилучшие районы путем выбора буферного расстояния между автомобильными дорогами, линиями электропередачи, сельскохозяйственными угодьями, населенными пунктами и по другим критериям. Наконец, были обсуждены наиболее важные результаты исследований и представлена карта пригодности для фотогальванических систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нахичеванская АР расположена на юго-западе Азербайджана, на 38°82'–39°78' с. ш. и 44°77'–46°13' в. д. 65% территории находится на высоте более 750 м над уровнем моря. Район расположен в полузасушливой климатической зоне. Нахичеванская АР окружена Даралагезским хребтом Малого Кавказа на севере и Зангезурским хребтом на востоке. Площадь Республики составляет 5387 км². Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность в регионе колеблется от 1220 до 1699 кВтч/м² в год [Global Solar Atlas..., 2020] (см. рис. 3). Это самый высокий показатель на Южном Кавказе со среднегодовым значением 1460 кВтч/м². Кроме того, по своему географическому и блокадному положению, а также надежности

электроснабжения Нахичеванской АР может считаться наиболее перспективным географическим регионом Азербайджана для инвестиций в солнечную энергетику.

Значения суммарного солнечного излучения на горизонтальной поверхности в Нахичевани были рассчитаны путем преобразования данных ЦМР с использованием инструмента солнечного излучения на основе ГИС и сравнения данных GSA. В зависимости от топографических особенностей значения прямого солнечного излучения играют важную роль в определении наклона и азимута фотоэлектрических панелей. Поскольку северные районы Республики имеют среднегорный рельеф, то здесь наблюдаются более низкие значения радиации по сравнению с южными районами. Угол и направление солнечных лучей играют важную роль в определении угла установки фотоэлектрических панелей. Например, в районе 39°21' с. ш. и 45°40' ю. д. максимальный угол азимута светового дня в течение года составляет 74,5° (22 июня), а минимальный – 27,5° (22 декабря). Общая годовая продолжительность солнечного сияния составляет 2366 часов, суточная продолжительность солнечного сияния составляет максимум 13 и минимум 8,5 часов в сутки. Фотоэлектрические панели удобнее устанавливать по южному азимутальному углу (между 136,78–226,37°) под углом 36–38° относительно широты, на которой находится Нахичевань (табл. 5). Кроме того, в этом географическом месте годовой общий горизонтальный DNI (199 кВтч/м²), DHI (67 кВтч/м²), индекс ясности (0,597) и уровень месячной температуры воздуха близки к идеальному рабочему диапазону для солнечных панелей в большинстве месяцев (25°C) (табл. 6).

Пространственные данные, включенные в исследование, были получены с помощью передовой системы наблюдения за землей, радара с синтезированной аппаратурой с прогрессивной решеткой (PALSAR) и спутников Landsat 7 [Alaska Satellite Facility..., 2020]. Данные цифровой модели высот имеют разрешение 12,5 × 12,5 м. С их использованием были созданы карты высот, наклона и вида. С помощью инструментов ArcMap определены уклон и рельеф поверхности Шарурского, Орду-бадского, Джульфинского, Шахбузского и Бабекского районов. Таким образом, было определено, что установка фотоэлектрических панелей на строительных площадках с уклоном до 4°, или 7%, и более целесообразна с точки зрения производства энергии и принципов экономической эффективности. Годовая продолжительность солнечного сияния, являющаяся одним из важнейших параметров эффективной работы фотоэлектрических электростанций в регионе, составляет не менее

2470 часов, а среднегодовой уровень горизонтального излучения на квадратный метр – 1460 кВтч (4,35 кВтч/м² в сутки) (табл. 7, см. рис. 3). На карте распределения годовой продолжительности солнечного сияния в Нахичеванской АР средняя продолжительность рассчитана как 10,5 часов в день

[Global Monitoring Laboratory..., 2020]. Чтобы солнечные электростанции работали эффективно, следует отдавать предпочтение районам с солнечным сиянием не менее 6,5 часов и наименьшей облачностью, которые влияют на поток энергии на 10–25% [Sun power..., 2020].

Таблица 6

Средние значения солнечной радиации, индекса чистоты и температуры в Нахичевани
[Solargis..., 2020; Global Solar Atlas..., 2020]

Месяц	Солнечное излучение на горизонтальной поверхности, кВтч/м ²		Индекс чистоты <i>CI</i>	Температура, °C
	Прямое	Рассеянное		
I	92	35	0,502	–4,6
II	132	52	0,536	–0,3
III	180	77	0,557	5,9
IV	226	90	0,559	10,6
V	271	97	0,588	15,3
VI	307	96	0,634	20,3
VII	306	99	0,647	24,0
VIII	283	79	0,661	24,4
IX	235	61	0,660	19,3
X	163	52	0,594	13,2
XI	107	40	0,533	5,4
XII	83	30	0,504	–0,6
Год	199	67	0,597	11,1

Таблица 7

Продолжительность солнечного сияния и участки с уклоном до 4° (7%) [Babayev, 1999]

Район	Площадь, км ²	Продолжительность солнечного сияния, ч/год
Нахичеваньский	92,6	2366
Шарурский	387,8	2597
Джюльфинский	287,9	2370
Ордубадский	198,7	2559
Шахбузский	218,6	2592
Садаракский	58,4	2660
Бабекский	135,7	2475

Еще одним важным критерием выбора места установки является размещение электростанции на минимальном расстоянии от потребителя. Таким образом, станции целесообразнее располагать вблизи районов с высоким спросом на электроэнергию, таких как городские поселения, предприятия промышленного производства и фабрики. Данные, такие как линии электропередачи, трансформаторы, автомагистрали, охраняемые зоны и сельскохозяйственные угодья, собранные с соответствующих тематических карт и базы данных OpenStreetMap, были оценены для определения оптимального места для установ-

ки электростанции. Кроме того, при выборе участка следует учитывать оседание почвы, оползни, наводнения; районы, подверженные другим стихийным бедствиям, должны находиться в пределах определенного диапазона буферных расстояний с оптимальными площадями [Al Garni, Awasthi, 2017].

Измеренные значения, характеризующие подкритерии и ограничения в рамках основных критериев для определения наиболее подходящих областей, подробно описаны в таблице 8. Здесь по степени важности рассматриваются следующие ограничивающие факторы:

- буферная 500-метровая зона до жилых районов, запретных и охраняемых территорий;
- 400-метровая буферная зона до озер;
- участки с уклоном до 4°;
- 300-метровая буферная зона до рек;
- 100-метровая буферная зона до сельскохозяйственных угодий;
- 300-метровая зона до автомобильных дорог.

При этом районы, где суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, являющаяся основным определяющим критерием, ниже 1350 кВтч/м² в год, были отнесены к непригодным из-за низкой мощности выработки электроэнергии. Например, при общем излучении 1350 и 1500 кВтч/м² разница в выработке энергии солнечными панелями на площади 1000 м² составит примерно 17000 кВтч/год (151 783 и 168 647 кВтч/год соответственно). Расчет проводится на основе формулы для

расчета солнечного выхода фотоэлектрической системы

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot PR, \quad (6)$$

здесь E – генерируемая электрическая энергия (кВтч), A – общая площадь солнечной панели (м²), r – эффективность солнечной панели (15%), H – излучение, поступающее на наклонную принимающую поверхность панелей (затенение не включено) и PR – коэффициент потерь (0,75). В зависимости от местоположения, технологии и размера системы эти 25% потерь включают потери инвертора (от 6 до 15%), временные потери (от 5 до 15%), потери в кабеле постоянного тока (от 1 до 3%), потери в кабеле переменного тока (от 1 до 3%), потери на затенение (от 0 до 40%, в зависимости от площади), потери из-за слабого излучения (от 3 до 7%), потери из-за пыли, снега (2%) [Solar energy output..., 2020].

Таблица 8

Критерии выбора месторасположения для солнечных электростанций [Doorga et al., 2019]

Критерии	Подкритерии	Ограничения
Потенциал солнечной энергии	Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность	1350 кВтч/м ² год и выше
Топография	Уклон	До 4° (7%)
Климат	Продолжительность солнечных и пасмурных дней	До 45 дней
Землепользование	Почвы непригодные для сельского хозяйства	Бесплодные почвы (песчаные, серые, серо-коричневые, подверженные ветровой и водной эрозии)
Подключение источника питания	Расстояние до ЛЭП	До 5 км
Расстояние до зон потребления энергии	Расстояние до подстанций	До 10 км
	Расстояние до населенных пунктов	Между 300–15 000 м
Транспорт	Расстояние до автодороги	От 300–500 м
Расстояние до охраняемых территорий	Национальные парки и заказник	
Расстояние до охраняемых территорий	Ручьи, озера, реки и т. д.	

В регионе определены площади, соответствующие критериям, указанным в таблице 8. В результате классификации их буферных расстояний создана тематическая карта в масштабе 1:500 000. Эта карта была создана с помощью взвешенного наложения данных пространственного и метеорологического анализа региона с использованием инструмента переклассификации ArcGIS и модели процесса аналитической иерархии. Для определения буферного расстояния использовались инструменты растрового изображения, инструменты расстояния на основе раstra и инструменты евклидова расстояния (табл. 9). Установка солнечных электростанций

вблизи жилых районов дает экономическое преимущество с точки зрения передачи электроэнергии без потерь. Кроме того, в качестве буферной зоны выбирается не менее 1 км территории вокруг жилых районов с учетом будущих демографических изменений в определенных местах. Для жилых районов он был отмечен на карте как буферная зона 1 (>1000 м), буферная зона 2 (1001–2000 м), буферная зона 3 (2001–5000 м) и буферная зона 4 (<5000 м) (см. рис. 5). В результате площадь всех определенных регионов была рассчитана с помощью инструмента «взвешенное наложение» в среде ГИС с использованием метода аналитической иерархии процессов.

Таблица 9

Определение пригодности места по основным критериям, подкритериям и показателям для установки солнечных электростанций

Основные критерии	Подкритерии	Индикаторы	Средние значения	Статус пригодности
Потенциал солнечной энергии	Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, кВтч/м ² в год	1220–1350	1285	Низкая
		1351–1500	1420	Средняя
		1501–1699	1600	Высокая
Топография (рельеф, склон, аспект)	Угол наклона солнечных панелей (южное направление)	1. Широта местности (38–40° с. ш.)	Расчет угла: $38^\circ \times 0,87 + 3,1 = 36^\circ$	Пригодна
		2. Годовой фиксированный угол солнечных панелей (36–38°)	$39^\circ \times 0,87 + 3,1 = 37^\circ$	
			$40^\circ \times 0,87 + 3,1 = 38^\circ$	
	Уклон поверхности региона	7–21% (4–12°)	14% (8°)	Высокая
		21–39% (12–20°)	30% (16°)	Средняя
		39–100% (20–45°)	60% (31°)	Не пригодна
Климат	Высота над уровнем моря (диапазон благоприятных климатических условий), м	750–965	850	Высокая
		965–1200	1080	Средняя
		≥1200	≥1200	Не пригодна
	Количество пасмурных дней в области	65–75	70	Не пригодна
		55–65	60	Средняя
		45–55	50	Высокая
Электрическое подключение	Расстояние до ЛЭП, км	≤5	2,5	Высокая
		6–10	8	Средняя
		≥11	≥11	Не пригодна
	Расстояние до подстанции, км	≤6	4	Высокая
		7–12	8,5	Средняя
		≥13	≥13	Не пригодна
Транспорт	Расстояние до автомагистралей, км	≤2,5	1,25	Высокая
		2,6–5	3,45	Средняя
		≥5	3,60	Низкая

Еще одним вопросом при определении потенциальных территорий для развития солнечных электростанций является определение уклона и аспект местности региона в соответствии с принципами установки электростанций. Для этого растровые данные цифровой модели рельефа были преобразованы в формат многоугольника, разделены на четыре части в соответствии со степенью наклона и для каждой была рассчитана площадь поверхности. Полученные значения площади в основном охватывают равнинные участки и южные склоны региона. Таким образом, сделан вывод, что регионы Республики с уклоном до 7% (4°) в категории наиболее подходящего места занимают площадь 1244 км². Установка в регионе солнечных электростанций на общей площади 1786 км² с уклоном 7–21% (4–12°)

из-за крутизны склонов является более затратной с экономической точки зрения [Solargis..., 2020]. Однако, следуя техническим процедурам, можно преобразовать фотоэлектрические панели для размещения их в доступные места. Установка солнечных электростанций третьей (1239 км²) и четвертой (1270 км²) категорий с уклоном 21–39% (12–20°) и 39–100% (20–45°) включает территории, трудные для использования солнечной энергии (см. рис. 4). Эти данные взвешиваются для всех регионов путем применения бинарной матрицы сравнения их критериев с использованием метода иерархии аналитических процессов (табл. 4).

Расстояние до подстанций и линий электропередачи играет важную роль в выборе наиболее подходящего места для установки солнечных электро-

станций с точки зрения предотвращения потерь энергии и дополнительных затрат. Исходя из этого аргумента, оптимальное расстояние от планируемых площадок до подстанций и ЛЭП не должно превышать 6 км, так как это значительно увеличивает первичные инвестиционные затраты [Noorollahi et al., 2016]. Места, где расстояние до подстанции и электросети составляет менее 2000 м, считаются очень подходящими для установки солнечных электростанций, однако участки на расстоянии между 2001–4000 м являются средне подходящими, 4001–6000 м – менее подходящими, а участки на расстоянии более 6001 м – неподходящими (см. рис. 5). Общие значения индикаторов для всех областей с этими четырьмя различными значениями расстояний были рассчитаны по взвешенной модели АИП.

Наличие автомагистрали на территории, предназначенной для установки солнечной электростанции, считается экономическим критерием с точки зрения предотвращения дополнительных инвестиций для транспортировки блоков солнечной энергии. Размещение станций рядом с дорогами снижает дополнительные затраты на инфраструктурные работы, такие как строительство шоссе, а также предотвращает нанесение ущерба окружающей среде и ландшафту [Al Garni, Awasthi, 2017]. Как показано на рис. 5, расстояние от 0 до 1000 м обозначено как 4 (высокая пригодность), от 1001 до 3000 м – 3 (средняя пригодность), от 3001 до 5000 м – 2 (низкая пригодность), от 7001 м и выше было отмечено как 1 (не пригодно).

В исследовании были проанализированы данные четырех основных критериев и 14 подкритериев. В модели АНР подходящие места, которые были определены путем применения матрицы парных сравнений, были ранжированы по четырем категориям от высокого до низкого. Коэффициент парных сравнений был рассчитан для проверки всех взвешенных значений CR , и было определено, что он находится на уровне 0,08 (оценочное суждение, 0,10). Затем, используя функцию моделирования Overlay в программном обеспечении ArcMap, взвешенные критерии были добавлены к областям с высоким общим солнечным излучением на горизонтальной поверхности, был определен уровень пригодности места для размещения солнечных фотоэлектрических станций. По общему количеству суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Нахичеванской АР была рассчитана возможность производства электроэнергии от фотоэлектрических панелей. Например, в Бабекском районе годовое значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность составит 1597 кВтч/м²,

а среднегодовое производство электроэнергии на 1 м² солнечной панели – 180 кВтч (КПД 15%).

ВЫВОДЫ

В Нахичеванской АР подходящие места для установки электростанций в районах с высокой суммарной солнечной радиацией на горизонтальной поверхности в результате исследования с использованием модели АНР делятся на три категории: высокой, средней и низкой пригодности.

В результате взвешенного наложения определенных критериев с использованием инструмента ArcMap Overlay было обнаружено, что 9,5% (510 км²) территории Нахичеванской АР соответствуют районам, наиболее пригодным для размещения солнечных электростанций.

Сделан вывод, что площади со средней и низкой пригодностью для установки солнечных электростанций в регионе составляют 12% (645 км²) и 24% (1290 км²) соответственно.

54,5% исследуемой территории (2930 км²) не соответствуют критериям выбора площадки (см. рис. 5), основными из которых являются низкий суммарный уровень радиации, высокая степень облученности, охраняемые территории, плодородность почвы, плохая инфраструктура и непригодность рельефа местности.

В результате анализа пространственных, метеорологических, экологических и связанных с инфраструктурой показателей сделан вывод, что южная часть Джульфинского, Ордубадского и Бабекского районов являются наиболее оптимальными территориями для размещения электростанций.

Из общей площади 510 км², пригодной для размещения фотоэлектрических станций, 109 км² расположены в Ордубадском, 98 км² – в Джульфинском, 124 км² – в Бабекском, 103 км² – в Шарурском и 76 км² – в Шахбузском районах.

В результате расчета можно построить фотоэлектрические электростанции общей мощностью 25 500 МВт на площади 510 км² (примерно 20 000 м² земель требуется для строительства солнечной электростанции мощностью 1 МВт). Эти электростанции могут вырабатывать 38,1 млрд кВтч электроэнергии в год, что примерно в 1,5 раза превышает общий объем производства электроэнергии в стране. Это не только сделает регион преимущественно важным с точки зрения энергетической безопасности, но также позволит ему быть экологически чистым, предотвратить глобальное потепление и загрязнение воздуха, не нанести вред здоровью человека, поддержать экономический рост и повысить конкурентоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Al Garni H.Z., Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied energy*, 2017, vol. 206, p. 1225–1240, DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- Asakereh A., Soleymani M., Sheikhdavoodi M.J. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, *Iran. Solar Energy*, 2017, vol. 155, p. 342–353, DOI: 10.1016/j.soler.2017.05.075.
- Babayev S. Geography Nakhchivan Autonomous Republic. Elm, Baku, 1999, 227 p.
- Beccali M., Cellura M., Mistretta M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, *Renewable energy*, 2003, vol. 28(13), p. 2063–2087, DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00102-2.
- Devi K., Yadav S.P. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for plant location selection with ELECTRE method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66(9-12), p. 1219–1229, DOI: 10.1007/s00170-012-4400-0.
- Doorga J.R., Rughooputh S.D., Boojhawon R. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius, *Renewable energy*, 2019, vol. 133, p. 1201–1219, DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.105.
- Effat H.A. Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis, *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2013, vol. 2(1), p. 205–220.
- Gardashov R., Eminov M., Kara G., Kara E.G.E., Mammadov T., Huseynova X. The optimum daily direction of solar panels in the highlands, derived by an analytical method, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 120, 109668, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109668.
- Khan G., Rath S. Optimal site selection for solar PV power plant in an Indian state using geographical information system (GIS), *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2014, vol. 2(7), p. 260–266.
- Linkov I., Moberg E. Multi-criteria decision analysis: environmental applications and case studies, CRC Press, 2011, 179 p.
- Mammadov F. Yearly average maps of solar radiation in Azerbaijan, *Energy Power*, 2013, vol. 3, p. 44–50, DOI: 10.5923/j.ep.20130304.02.
- Merrouni A.A., Elalaoui F.E., Mezrhab A., Mezrhab A., Ghennioui A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco, *Renewable energy*, 2018, vol. 119, p. 863–873, DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.044.
- Noorollahi E., Fadai D., Akbarpour Shirazi M., Ghodsipour S.H. Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) – a case study of Iran, *Energies*, 2016, vol. 9(8), 643, DOI: 10.3390/en9080643.
- Polatidis H., Haralambidou K., Haralambopoulos D. Multi-criteria decision analysis for geothermal energy: A comparison between the ELECTRE III and the PROMETHEE II methods, *Energy Sources, p. B, Economics, Planning and Policy*, 2015, vol. 10(3), p. 241–249, DOI: 10.1080/15567249.2011.565297.
- Quijano R., Dominguez J., Botero S. Sustainable energy planning model (MODERGIS) application to integrate renewable energy in the Colombia case, 2010, 17 p.
- Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation, McGraw, New York, 1980, 214 p.
- Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, p. 11–17, DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.042.
- Watson J.J., Hudson M.D. Regional scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation, *Landscape and Urban Planning*, 2015, vol. 138, p. 20–31, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.001.
- Vulkan A., Kloog I., Dorman M., Erell E. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas, *Energy and Buildings*, 2018, vol. 169, p. 97–109, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.052.
- Wang C.-N., Nguyen V.T., Thai H.T.N., Duong D.H. Multi-criteria decision making (MCDM) approaches for solar power plant location selection in Viet Nam, *Energies*, 2018, vol. 11(6), p. 1504, DOI: 10.3390/en11061504.
- Электронные источники
- Alaska Satellite Facility, Making remote-sensing data accessible, URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=nakhchivan&m=35.399139134002!42.7060546875!6!1!0!0%2C2> (access data 16.10.2020).
- Earth Data Search, ASTER Global Digital Elevation Model V003, URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search/?hdr=1%20to%2030%20meters&fi=ASTER&fst0=Land%20Surface> (access data 12.09.2020).
- Global Solar Atlas 3.0, Azerbaijan, Nakhchivan Autonomy Republic, Solar energy resource, 2020. https://globalsolaratlas.info/map?r=AZE:AZE.7_1&c=39.30579,45.4625,9 (access data 09.08.2020).
- Global Monitoring Laboratory, Earth System Research Laboratories, 2020, URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/table.php?lat=40.417&lon=49.825&year=2020> (access data 05.10.2020).
- Solar energy output, Simulation and design of solar systems, URL: <https://photovoltaicsoftware.com/principle-resources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (access data 19.10.2020).
- Sun power, URL: <https://us.sunpower.com/blog/2019/05/09/how-solar-panels-work-cloudy-days> (access data 14.11.2020).
- Solargis, Solar resource maps of Azerbaijan, URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/azerbaijan> (access data 17.08.2020).

Поступила в редакцию 21.01.2021

После доработки 13.10.2021

Принята к публикации 27.12.2021

OPTIMAL SITE SELECTION FOR SOLAR POWER STATIONS IN THE NAKHICHEVAN AR

N.S. Imamverdiyev

*Azerbaijan National Academy of Sciences, Institute of Geography, Department of Economic and Political Geography,
Scientific Researcher; email: imamverdiyev.nicat@gmail.com*

Since the electrical power output by converting total solar radiation using PV cells is low, it is necessary to identify areas with high solar radiation. However, low efficiency of PV panels (14–18%) and the low intensity of total solar radiation on a horizontal surface require a large installation space to achieve a certain power level. Due to the high cost of installing solar power plants, a comprehensive systematic assessment of the geographic factors of a region is necessary to select the most suitable location. The reason we chose Nakhichevan as a study area is that the radiation level is high compared to other regions of Azerbaijan (1220–1699 kWh/m² per year), and the annual duration of sunshine exceeds 2500 hours. Since the creation of solar power plants in regions with high values of the total radiation on a horizontal surface generally depends on technical, economic and environmental criteria, the areas corresponding to high criteria values in the model were thoroughly investigated using balanced comparison to identify suitable sites. The Analytical Process Hierarchy (AHP) model, based on Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, was used to identify suitable locations for solar power plants. In the first phase of the study seven criteria were analyzed to determine suitable locations, i.e. total solar radiation on a horizontal surface, slope gradient, land use, buffer distance from areas with high annual solar energy potential to residential areas, proximity to substations, highways and power supply lines. In the second stage the degree of accessibility and suitability of areas according to certain criteria was determined using the Weighted Overlay tool in Geographic Information Systems (GIS). As a result of the study, it was concluded that 9,5% (510 km²) of the area of Nakhichevan has high suitability, 12% (645 km²) – average suitability and 24% (1290 km²) – low suitability for placing solar power plants. The remaining 54,5% (2930 km²) of the region are unsuitable territories because of low radiation, high slope, the presence of protected areas, settlements and agricultural areas, and poorly developed infrastructure. Optimal locations are mainly in the southern and eastern parts of the region, as shown in the polygon shape on the suitability map.

Keywords: renewable energy sources, solar energy, geographic information system, model of the analytical hierarchy process, site selection, Nakhichevan AR

REFERENCES

- Al Garni H.Z., Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied Energy*, 2017, vol. 206, p. 1225–1240, DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- Asakereh A., Soleymani M., Sheikhdavoodi M.J. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran, *Solar Energy*, 2017, vol. 155, p. 342–353, DOI: 10.1016/j.solener.2017.05.075.
- Babayev S. Geography Nakhchivan Autonomous Republic. Elm, Baku, 1999, p. 227.
- Beccali M., Cellura M., Mistretta M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, *Renewable Energy*, 2003, vol. 28(13), p. 2063–2087, DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00102-2.
- Devi K., Yadav S.P. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for plant location selection with ELECTRE method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66(9-12), p. 1219–1229, DOI: 10.1007/s00170-012-4400-0.
- Doorga J.R., Rughooputh S.D., Boojhawon R. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius, *Renewable Energy*, 2019, vol. 133, p. 1201–1219, DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.105.
- Effat H.A. Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis, *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2013, vol. 2(1), p. 205–220.
- Gardashov R., Eminov M., Kara G., Kara E.G.E., Mammadov T., Huseynova X. The optimum daily direction of solar panels in the highlands, derived by an analytical method, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 120, p. 109668, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109668.
- Khan G., Rathi S. Optimal site selection for solar PV power plant in an Indian state using geographical information system (GIS), *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2014, vol. 2(7), p. 260–266.
- Linkov I., Moberg E. Multi-criteria decision analysis: environmental applications and case studies, CRC Press, 2011, 179 p.
- Mammadov F. Yearly average maps of solar radiation in Azerbaijan, *Energy Power*, 2013, vol. 3, p. 44–50, DOI: 10.5923/j.ep.20130304.02.
- Merrouni A.A., Elalaoui F.E., Mezrhab A., Mezrhab A., Ghennioui A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study, Eastern Morocco, *Renewable Energy*, 2018, vol. 119, p. 863–873, DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.044.
- Noorollahi E., Fadaei D., Akbarpour Shirazi M., Ghodsipour S.H. Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) a case study of Iran, *Energies*, 2016, vol. 9(8), p. 643, DOI: 10.3390/en9080643.

- Polatidis H., Haralambidou K., Haralambopoulos D. Multi-criteria decision analysis for geothermal energy: A comparison between the ELECTRE III and the PROMETHEE II methods, *Energy Sources, p. B, Economics, Planning, and Policy*, 2015, vol. 10(3), p. 241–249, DOI: 10.1080/15567249.2011.565297.
- Quijano R., Domínguez J., Botero S. Sustainable energy planning model (MODERGIS) application to integrate renewable energy in the Colombia case, 2010, 17 p.
- Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation, McGraw, New York, 1980, 214 p.
- Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, p. 11–17, DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.042.
- Vulkan A., Kloog I., Dorman M., Erell E. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas, *Energy and Buildings*, 2018, vol. 169, p. 97–109, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.052.
- Watson J.J., Hudson M.D. Regional scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation, *Landscape and Urban Planning*, 2015, vol. 138, p. 20–31, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.001.
- Wang C.-N., Nguyen V.T., Thai H.T.N., Duong D.H. Multi-criteria decision making (MCDM) approaches for solar power plant location selection in Viet Nam, *Energies*, 2018, vol. 11(6), p. 1504, DOI: 10.3390/en11061504.
- Web sources*
- Alaska Satellite Facility*, Making remote-sensing data accessible, URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=nakhchivan&m=35.399139134002!42.7060546875!6!1!0!0%2C2> (access data 16.10.2020).
- Earth Data Search*, ASTER Global Digital Elevation Model V003, URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search/?hdr=1%20to%2030%20meters&fi=ASTER&fst0=Land%20Surface> (access data 12.09.2020).
- Global Solar Atlas 3.0*, Azerbaijan, Nakhchivan Autonomy Republic, Solar energy resource, 2020. https://globalsolaratlas.info/map?r=AZE:AZE.7_1&c=39.30579,45.4625,9 (access data 09.08.2020).
- Global Monitoring Laboratory*, Earth System Research Laboratories, 2020, URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/table.php?lat=40.417&lon=49.825&year=2020> (access data 05.10.2020).
- Solar energy output*, Simulation and design of solar systems, URL: <https://photovoltaicsoftware.com/principle-resources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (access data 19.10.2020).
- Sun power*, URL: <https://us.sunpower.com/blog/2019/05/09/how-solar-panels-work-cloudy-days> (access data 14.11.2020).
- Solargis*, Solar resource maps of Azerbaijan, URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/azerbaijan> (access data 17.08.2020).

Received 21.01.2021

Revised 13.10.2021

Accepted 27.12.2021