

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 551.55/551.8

DOI: 10.15372/GIPR20220219

Н.С. ИМАМВЕРДИЕВ

Институт географии Национальной академии наук Азербайджана,
AZ1143, Баку, ул. Гусейна Джавида, 31, Азербайджан, imamverdiyev.nicat@gmail.com

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ДЛЯ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
(НА ПРИМЕРЕ НАХИЧЕВАНСКОЙ АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКИ, АЗЕРБАЙДЖАН)**

Представлено исследование по выбору оптимальных территорий для установки солнечных фотоэлектрических станций. Актуальность проведенной работы обусловлена тем, что электрическая энергия, производимая путем преобразования суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности, состоящей из прямых и рассеянных компонентов элементов фотоэлектрических (ФЭ) панелей, имеет низкую выходную мощность, поэтому необходимо определить области с высоким коэффициентом мощности для более эффективного производства электроэнергии. При этом выявлено, что из-за низкого КПД ФЭ-панелей (14–18 %) и слабой интенсивности суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности для достижения определенного уровня мощности требуется большое пространство для установки. Учитывая также высокую стоимость солнечных электростанций, для выбора наиболее подходящего места требуется комплексная систематическая оценка географических факторов региона. Выбор Нахичеванской автономной республики в качестве района исследования объясняется тем, что уровень радиации в ней высок по сравнению с другими регионами Азербайджана (1220–1699 кВт·ч/м² в год), и число часов солнечного сияния в год превышает 2500. Поскольку создание солнечных электростанций в регионах с высокими значениями суммарной радиации на горизонтальной поверхности зависит от технических, экономических и экологических критериев, для определения оптимальных площадей использованы описательные критерии. Модель аналитической иерархии процессов, основанная на методах многокритериального принятия решений, применена для определения подходящего места установки солнечных электростанций. На первом этапе исследования проанализированы семь критериев определения подходящих мест: значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, уклон, землепользование, буферное расстояние от районов с высоким годовым потенциалом солнечной энергии до жилых районов, близость к подстанциям, автомагистралям и линиям электропередач. На втором этапе уровень доступности-пригодности областей в рамках определенных критериев в ГИС определялся с помощью инструмента «Взвешенный оверлей». Также с помощью данного инструмента в ГИС выявлен уровень пригодности территорий по определенным критериям. В результате исследования сделан вывод, что 9,5 % (510 км²) территории Нахичеванской АР имеют высокую пригодность, 12 % (645 км²) — среднюю и 24 % (1290 км²) — низкую пригодность для размещения солнечных электростанций. Остальные 54,5 % области (2930 км²) относятся к территориям, которые не подходят для использования из-за низкой радиации, высокого уклона, наличия особо охраняемых территорий, населенных пунктов, сельскохозяйственных территорий и слабо развитой инфраструктуры. Оптимальные места в основном приурочены к южной и восточной частям региона.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, геоинформационная система, модель аналитической иерархии процесса, выбор места, критерии определения.

N.S. IMAMVERDIEV

Institute of Geography, Azerbaijan National Academy of Sciences,
AZ1143, Baku, ul. Huseyn Javid, 31, Azerbaijan, imamverdiyev.nicat@gmail.com

**TECHNIQUE OF OPTIMAL SITE SELECTION
FOR INSTALLING SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER STATIONS
(AS EXEMPLIFIED BY THE NAKHCHIVAN AUTONOMOUS REPUBLIC, AZERBAIJAN)**

This study is concerned with the selection of optimal territories for installing solar photovoltaic power stations. The relevance of the research done is explained by the fact that electric energy generated by converting total solar radiation on a horizontal

surface consisting of direct and diffuse components of PV cells has low output power; therefore, it is necessary to identify areas with a high power factor for more efficient power generation. However, due to the low efficiency of PV panels (14–18 %) and the low intensity of total solar radiation on a horizontal surface, a large installation space is required 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 the region is required to select the most suitable location. Our selection of the Nakhchivan Autonomous Republic as the study area is explained by the fact that the radiation level is high compared to other regions of Azerbaijan (1220–1699 kW·h/m² per year), and the number of hours of sunshine per year exceeds 2500. Since the creation of solar power plants in regions with high values of total radiation on a horizontal surface depends on technical, economic and environmental criteria, descriptive criteria are used to determine the optimal areas. 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: total solar radiation on a horizontal surface, slope, land use, buffer distance from areas with high annual solar energy potential to residential areas, proximity to substations, motor roads, and power lines. In the second stage, the level of accessibility and suitability of areas within the framework of certain criteria was determined using the Weighted Overlay tool in Geographic Information Systems (GIS). In the second stage, using the weighted overlay tool in geographic information systems (GIS), the level of suitability of territories was determined according to certain criteria. As a result, of the study, it was concluded that 9,5 % (510 km²) of the land of the Nakhchivan Autonomous Republic has high suitability, 12 % (645 m²) — medium suitability, and 24 % (1290 km²) — low suitability for placing solar power plants. The remaining 54.5 % (2930 km²) of the region belongs to the territories that are not suitable for use due to low radiation, high slope, the presence of protected areas, settlements, agricultural areas and poorly developed infrastructure. Optimal locations cover mainly the southern and eastern parts of the region.

Keywords: renewable energy sources, solar energy, geographic information systems, model of the analytical hierarchy of the process, site selection, criteria for determination.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор географически подходящего места для эффективного производства энергии на фотоэлектрических солнечных электростанциях зависит от многих факторов. Для достижения конкретного результата можно получить более реалистичные цифры, используя пространственные и метеорологические данные исследуемого региона в географических информационных системах (ГИС) [1]. Число солнечных дней в Нахичеванской автономной республике (АР) составляет около 250, а средний уровень радиации — 1460 кВт·ч/м² в год, что определяет инвестиционную привлекательность данной территории в плане размещения здесь панелей солнечной энергии (рис. 1) [2]. С целью обеспечения энергетической безопасности региона и получения солнечной энергии с низкой стоимостью и максимальной выгодой необходимо определить подходящие участки для размещения фотоэлектрических солнечных электростанций. В данном исследовании использовалась многокритериальная методика принятия решений для определения пригодности территорий. Это лучший метод идентификации для анализа сложных и многоформатных данных [3]. Использование пространственной ГИС в форме интеграции с многокритериальным методом может помочь в углубленном анализе естественных событий, рациональной и систематической идентификации и интерпретации различных уровней риска [4].

Модели аналитической иерархии процесса (АИП) на основе модели притяжения модели расширения (МПМР) используются для связывания данных, полученных в результате анализа, и для определения соответствующих регионов. Метод АИП позволяет обнаружить альтернативный способ достижения общего результата путем анализа собранных данных с точки зрения множества критериев и противоречивых целей [5]. Основная цель в нашем случае — это определение зоны со средним и высоким энергетическим потенциалом в соответствии с принципами выбора площадок солнечных электростанций. Для обеспечения экономических показателей эффективности производства солнечной электроэнергии, на этапе планирования места установки электростанции учитываются: годовая продолжительность солнечного сияния в регионе, уровень радиации, землепользование, эффективность сельского хозяйства, расстояние до дорог, линий электропередач и другие показатели. Объекты, загрязняющие поверхность фотоэлектрических панелей и создающие теневые эффекты, входят в число критериев, непосредственно влияющих на выработку энергии [6].

Каждому государству присуща своя уникальная природная среда, и это определяет разнообразие примеров использования многокритериальных методов на основе ГИС для определения наиболее оптимальных местоположений солнечных электростанций [7]. Например, в Иране были приняты во внимание 11 критериев [8]. Поскольку их превосходство относительно друг друга весьма неопределенное, использовалась модель АИП для взвешивания и была создана карта пригодности территорий для солнечных электростанций в среде ГИС. По результатам исследования Саудовской Аравии с

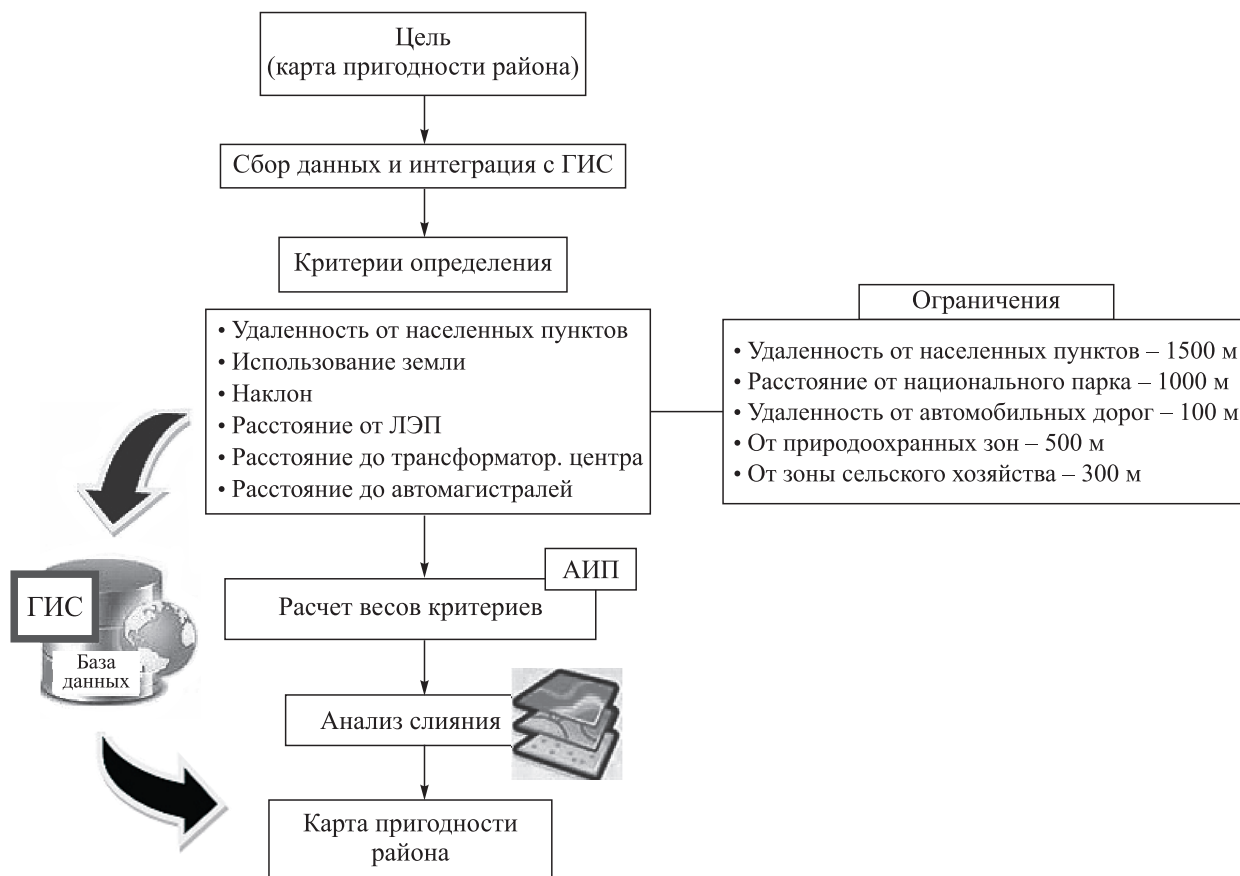


Рис. 1. Общая методика исследования.

применением методов АИП был сделан вывод, что наиболее подходящие территории для установки солнечных электростанций — северные и северо-западные регионы страны [9]. Методы АИП позволили определить оптимальные площади в соответствии с принципами размещения фотоэлектрических установок на определенном расстоянии от ограничительной зоны, такой как сельскохозяйственные районы, охраняемые природные территории, жилые районы.

В ходе исследований по определению подходящего района в провинции Хузестан (Иран) был сделан вывод, что даже при наихудшем сценарии потенциал производства солнечной энергии примерно в 1,75 раза превышает общий объем электроэнергии, произведенной в Иране в 2016 г. Здесь с широким использованием солнечных электростанций затраты на установку и инфраструктуру будут амортизированы, а общая стоимость производства солнечной энергии по сравнению с ископаемым топливом снизится [10]. В другом исследовании были определены четыре основных критерия (радиация, топография, технико-экономические и экологические критерии) и восемь подкритериев для планируемых солнечных электростанций в Восточном Марокко и создана карта пригодности потенциальных регионов для их размещения. В результате определено, что 19 % восточной части Марокко вполне подходит для установки солнечных электростанций [11].

Кроме того, есть несколько примеров оценки различных альтернативных источников энергии с использованием комбинации разных методов, основанных на принятии многокритериальных решений для больших территорий. Например, модель ELECTRE, включающая многокритериальный метод принятия решений, применяемый для анализа плана действий по исследованию технологий возобновляемой энергии в региональном масштабе. Так, на о. Сардиния 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 [7, 12]. Потенциал источников геотермальной энергии на о. Хиос (Греция) оценен путем взаимного сравнения методов PROMETHEE II и ELECTRE III [13]. В соответствии с

различными критериями устойчивости, для планирования и моделирования возобновляемых источников энергии в Колумбии был предложен метод под названием MODERGIS [14]. С его помощью зона исследования сначала была классифицирована в соответствии с потенциалом солнечной энергии, а затем были проанализированы параметры окружающей среды и определены подходящие площади для крупных фотоэлектрических установок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные цифровой модели рельефа (ЦМР) исследуемой области 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 Глобального солнечного атласа (ГСА) [15] и метеорологические карты для определения значений радиации в Нахичеванской автономной республике.

В литературе есть ряд исследований модели АИП, включенной в методику принятия многокритериальных решений (МНР), которая основана на его интеграции с системами ГИС при выборе места для строительства солнечных электростанций. В них описаны различные критерии, определяющие выбор подходящего места, так как рабочие зоны имеют свои собственные характеристики в плане топографии, радиации, землепользования и инфраструктуры. Таким образом, в соответствии с принципами установки солнечной энергии были определены основные критерии, связанные с рельефом, климатическими и экологическими характеристиками территории. Собранные данные были сгруппированы в три класса (от высокой до низкой пригодности) и подразделяются на пространственные (высота, уклон, тень холма), климатические (суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, температура воздуха), окружающей среды (землепользование, охраняемые территории) и инфраструктурные (дороги и линии электропередач). Все данные, сгенерированные для создания подходящего места в ГИС, представлены как 100 % с помощью следующих инструментов: функция в растр, евклидово расстояние, переклассификация и взвешенное наложение в инструменте модели Оверлей. Кроме того, мы также использовали методы математико-статистического, картографического и географического моделирования.

Изучены три различных типа данных, критерий которых — это определенные места, подходящие для установки солнечных электростанций в регионах с высоким солнечным потенциалом: особенности рельефа региона и землепользования; метеорологические характеристики, в том числе значения суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность; энергетические мощности и инфраструктура района (электросети, подстанции, дороги и др.).

При планировании установки солнечной электростанции в любом районе основными факторами, которые необходимо учитывать, являются следующие: текущий спрос на электроэнергию в регионе и динамика его роста 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 (основное требование при выборе оптимальной площади для строительства солнечной станции) бывает высока, площади, соответствующие ограничительным критериям, иногда считаются непригодными: например, естественные формы рельефа, которые не подходят для строительства солнечных электростанций из-за неблагоприятного уклона (горные хребты и холмы), значительные затенения или ограниченные 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. Наличие особо охраняемых природных территорий (национальных парков, заповедников, природных и ландшафтных парков) и объектов культурного наследия (археологических памятников, исторических поселений и др.) также входит в число ограничительных критериев. Обычно отмечается, что оптимальное значение набора критериев не противоречит лучшему выбору других критериев. В случае противоречия между разными параметрами учитывается принцип «соответствия критериев с наименьшим ущербом» [16]. 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 эффективности производства. Окончательное решение о выборе наи-

более 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 следующих аспектов: высокий суммарный горизонтальный потенциал солнечной энергии региона; высокоэффективная (КПД ФЭ-панелей) и экономичная генерирующая мощность солнечных электростанций; положение оптимального азимута и наклона солнечных панелей, соответствующее минимальному эффекту затенения; расположение наиболее подходящего места на кратчайшем расстоянии до ЛЭП, автомагистралей и мест потребления электроэнергии.

При оценке экономической целесообразности солнечных электростанций мощностью 27 МВт в регионе было определено, что производство энергии на них примерно в 2,5 раза дороже по сравнению с работающими на ископаемом топливе. Годовая производственная мощность станции составляет 40,5 млн кВт·ч, а коэффициент использования установленной мощности ($CF = \text{произведенная за год энергия (Вт·ч)} / (\text{мощность станции (Вт)} \cdot \text{годовой период (ч)})$) — 17 %. Эту разницу можно уравновесить гарантированными стимулами, такими как «зеленый» тариф (долгосрочные контракты, гарантированные закупки и другие).

Отдельно обсуждены 14 подкритериев, связанных с использованием солнечной энергии, которые преимущественно отражают экономические, технические, географические и социальные условия региона (рис. 2). На основе метода МПР эти критерии оценены по пространственным данным и блок-схеме АИП, создан набор формул и решений. Кроме того, модель АИП применена для объяснения перечисленных в методологии исследования проблем (см. рис. 2) и анализа соответствующих критериев. В ходе работы была создана пара сравнительных матриц на основе множественных сравнений между измерениями, далее веса этих критериев служили основными факторами для определения оптимальных областей. Однако коэффициент согласованности (CR) применяется для оценки противоречивых решений в процессе попарного сравнения. Следующие шаги необходимы для выполнения АИП для n критериев [17].

Использование предложенной девятизначной шкалы P_{ij} позволяет критерию i объяснить оценку предпочтения критерию j для создания бинарной матрицы сравнения $m = (n \cdot n)$ по различным критериям. Здесь $j(P_{ij})$ 1. Критерии i и j одинаково важны 3. Критерии i немного важнее j 5. Критерии i умеренно важнее j 7. Критерии i значительно важнее, чем j 9. Критерии i чрезвычайно важнее, чем j 2, 4; 6, 8 — промежуточные значения. P_{ij} обозначает запись в i -й строке и j -м столбце матрицы m . Записи оценки предпочтения P_{ij} и P_{ji} должны удовлетворять следующему ограничению в формуле

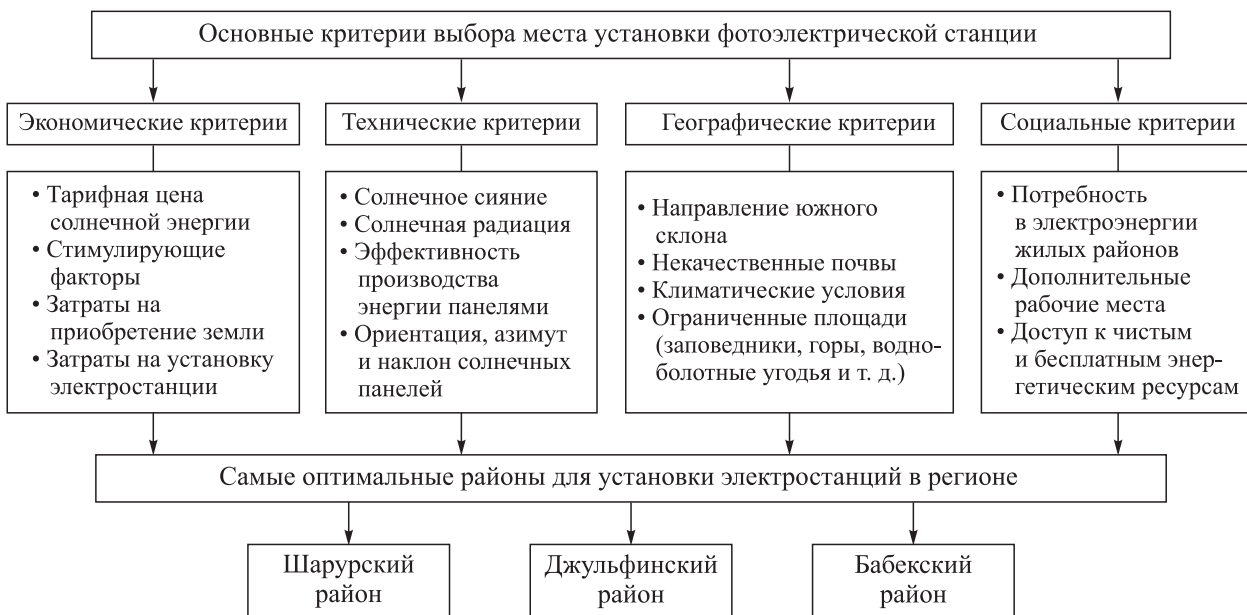


Рис. 2. Решающие критерии выбора подходящего участка для установки солнечных фотоэлектрических станций в соответствии с моделью аналитической иерархии процесса.

($P_{ij} \cdot P_{ji} = 1$). Далее, чтобы определить нормированную матрицу попарного сравнения m , сумма каждого столбца должна быть равна 1. Это можно получить с помощью уравнения

$$\overline{P_{ij}} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ij}}$$

для вычисления P_{ij} для каждого элемента матрицы m . Затем высчитывается среднее значение по строкам, чтобы получить относительный вес, используя уравнение

$$Wi = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{P_{ij}}}{n}.$$

Для каждого элемента относительный вес находится в диапазоне значений 0–1. Чтобы получить карту пригодности солнечных фотоэлементов (ПСФ), использована одна формула для каждого пикселя слоя исследуемой области. Если ограничение (r) существует, то $r = 0$, что приводит к значению SSM неподходящего местоположения. В противном случае ПСФ может быть определена путем нахождения суммы каждого значения критерия (xi), умноженного на соответствующий вес критерия (Wi):

$$\text{ПСФ} = \sum (i = 1)^n, xi \cdot Wi \cdot R,$$

где $r \in \{0,1\}$.

Коэффициент согласованности (CI) задается отношением CI/RI, где RI — индекс случайной согласованности, который изменяется в зависимости от количества принципов в сравнении (n), как представлено в случайном индексе (RI) для различных значений количества элементов ($n = \text{RI}, 2 = 0, 3 = 0,58, 4 = 0,90, 5 = 1,12, 6 = 1,24, 7 = 1,32, 8 = 1,41, 9 = 1,45, 10 = 1,49, 11 = 1,51, 12 = 1,48$) [17]. Индекс согласованности CI определяется с использованием формулы

$$\text{CI} = \frac{\lambda \max - n}{n - 1},$$

где $\lambda \max$ — максимальное собственное значение матрицы сравнения. В табл. 1 представлены собственные значения, полученные путем попарного сравнения критериев относительно цели выбора лучшего места для солнечных фотоэлектрических систем. Если $\text{CR} \leq 0,10$, то степень согласованности считается удовлетворительной [18]. В противном случае в парном сравнении будут серьезные несоответствия. Настоящее исследование включает семь элементов, связанных с критериями принятия решения, или $n = 7$. Соответственно, $\text{RI} = 1,32$ и $\text{CR} = 0,08$, что находится в приемлемом диапазоне.

Принимая во внимание вес критериев, представленных в исследованиях пригодности солнечного поля, была создана матрица двоичного сравнения (см. табл. 1), вычислен собственный вектор, показывающий вес приоритета каждого критерия, и сумма всех весов равна 1. CR рассчитан для проверки взвешенных значений каждого критерия ($\text{CR} = 0,08$). Поскольку он меньше 0,10, решения о ценности считаются приемлемыми. В то же время можно оценить альтернативы, которые возникают, когда значения критериев, добавленные после анализа чувствительности, проведенного с помощью основного сетевого инструмента в приложении «Super Decisions 3.2», изменяются в пределах 0,1–1 в зависимости от цели. Выявленные четыре региона Нахичеванской автономной республики (Шарурский, Бабекский, Джульфинский и Ордубадский) с высокими значениями солнечного излучения, необходимыми для установки солнечных электростанций, были оценены как альтернативные друг

Таблица 1

Матрица сравнения критериев выбора площадки для установки солнечных электростанций

Фактор	N (взвешенный оверлей)	$\lambda \max$	CI	RI	CR (CI/RI)
Солнечная радиация	9	0,4358	0,350	1,45	0,2413
Склоны	8	0,4036	0,159	1,41	0,1127
Аспект	7	0,2133	0,106	0,58	0,1827
Землепользование	6	0,8627	0,237	1,45	0,1634
Удаленность от дорог	2	0,3794	0,046	1,24	0,0370
Расстояние от ЛЭП	4	0,4052	0,070	0,90	0,0778
Удаленность от населенного пункта	5	0,4977	0,032	1,12	0,0285

другу. При выборе подходящих площадок основные критерии, распределяемые от высокого до низкого значения уровня важности, взвешиваются в соответствии с суммарной горизонтальной иррадиацией, землепользованием, уклоном и расстоянием до дорог и линий электропередач. Впоследствии Бабекский район в результате расчета матрицы попарного сравнения данных подкритериев, таких как радиация на горизонтальную поверхность ($1400\text{--}1699\text{ кВт}\cdot\text{ч}^2$), землепользование (плодородные почвы, бесплодные земли), уклон ($1\text{--}4^\circ$) и расстояние (от 1000 до 5000 м), был определен как наиболее подходящее место.

Выбор места ФЭ-панелей при использовании инструмента взвешенного общего перекрытия в ГИС, рассмотренных критериев (полученных из модели АИП) в сочетании с их соответствующими весом был рассмотрен в три этапа. Во-первых, поскольку входные слои имеют разные значения и диапазоны, каждый критерий должен быть приведен к общему масштабу, чтобы его можно было интегрировать в один слой. Затем значения во входных картах были проклассифицированы в общую шкалу предпочтений в диапазоне от 1 до 10 (10 — наиболее подходящий). На втором этапе каждый уровень критерия умножается на вес, или значимость критерия по отношению к АИП. В-третьих, полученные значения ячеек были добавлены друг к другу, чтобы сформировать окончательный композитный слой, и были определены подходящие области. Для этого в приложении ArcGIS 10.8 создана база данных с широким спектром инструментов пространственного анализа, а данные о суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в регионе проанализированы и систематизированы. Затем с помощью предложенной методологии МПР в областях с солнечным потенциалом определены лучшие районы путем выбора буферного расстояния между автомагистралями, линиями электропередач, сельскохозяйственными землями, поселениями и др. Наконец, были обсуждены наиболее важные результаты исследований и представлена карта пригодности для размещения ФЭ-систем. Кроме того, это приложение также хорошо совмещается с программами солнечного проектирования и моделирования (Homer Pro, pvPlanner, PVsyst, Solargis и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарная солнечная радиация на горизонтальной поверхности в Нахичеванской автономной республике составляет $1220\text{--}1699\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год [19]. Это самый высокий показатель на Южном Кавказе, со среднегодовым значением $1460\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Кроме того, в соответствии с географическим положением, а также с ситуацией с блокадой и безопасностью электроснабжения, Нахичеванская автономная республика может считаться наиболее перспективным географическим регионом в Азербайджане для инвестиций в солнечную энергию (рис. 3).

Значения суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Нахичевани были рассчитаны путем преобразования данных цифровой модели рельефа с использованием инструмента солнечной радиации на основе ГИС и сравнения данных Глобального солнечного атласа [15]. В зависимости от топографических особенностей значения прямого солнечного излучения играют важную роль при определении наклона и азимута ФЭ-панелей. Так, северные районы региона имеют средневысотный горный рельеф, что определяет более низкие значения радиации здесь по сравнению с южными районами. Угол и направление солнечных лучей существенно влияют на определение угла установки ФЭ-панелей. Например, в точке с координатами $39^\circ 21'$ с. ш., $45^\circ 40'$ в. д. максимальный угол падения солнечных лучей на протяжении года составляет $74,5^\circ$ (22 июня), а минимальный — $27,5^\circ$ (22 декабря). Общая годовая продолжительность солнечного сияния составляет 2532 ч, его дневная продолжительность — максимум 13 ч и минимум 8,5 ч. ФЭ-панели удобнее устанавливать по южному азимутальному углу (между $136,78$ и $226,37^\circ$) под углом $36\text{--}38^\circ$ относительно широты, на которой находится Нахичевань. Кроме того, в этом географическом месте годовое общее горизонтальное прямое нормальное облучение составляет $199\text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, диффузное горизонтальное — $67\text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, индекс ясности — 0,597, месячный уровень температуры воздуха 25°C , что близко к идеальному рабочему диапазону солнечных панелей для большинства месяцев в году (табл. 2).

Пространственные данные, включенные в исследование, получены от Advanced Land Observation System (ALOS), Progressive Array Synthetic Aperture Radar (PALSAR) и спутников Landsat 7. Данные цифровой модели рельефа имеют разрешение $12,5 \times 12,5\text{ м}$, с их использованием созданы карты высоты, уклона и аспекта местности. Уклоны и аспекты местности поверхностей Шарурского, Ордубадского, Джульфинского, Шахбузского и Бабекского районов определены с помощью инструментов ArcMap. Определено, что установка ФЭ-панелей на строительных площадках с уклоном до 4° , или 7 %, оптимальна в плане выработки энергии и экономической эффективности.

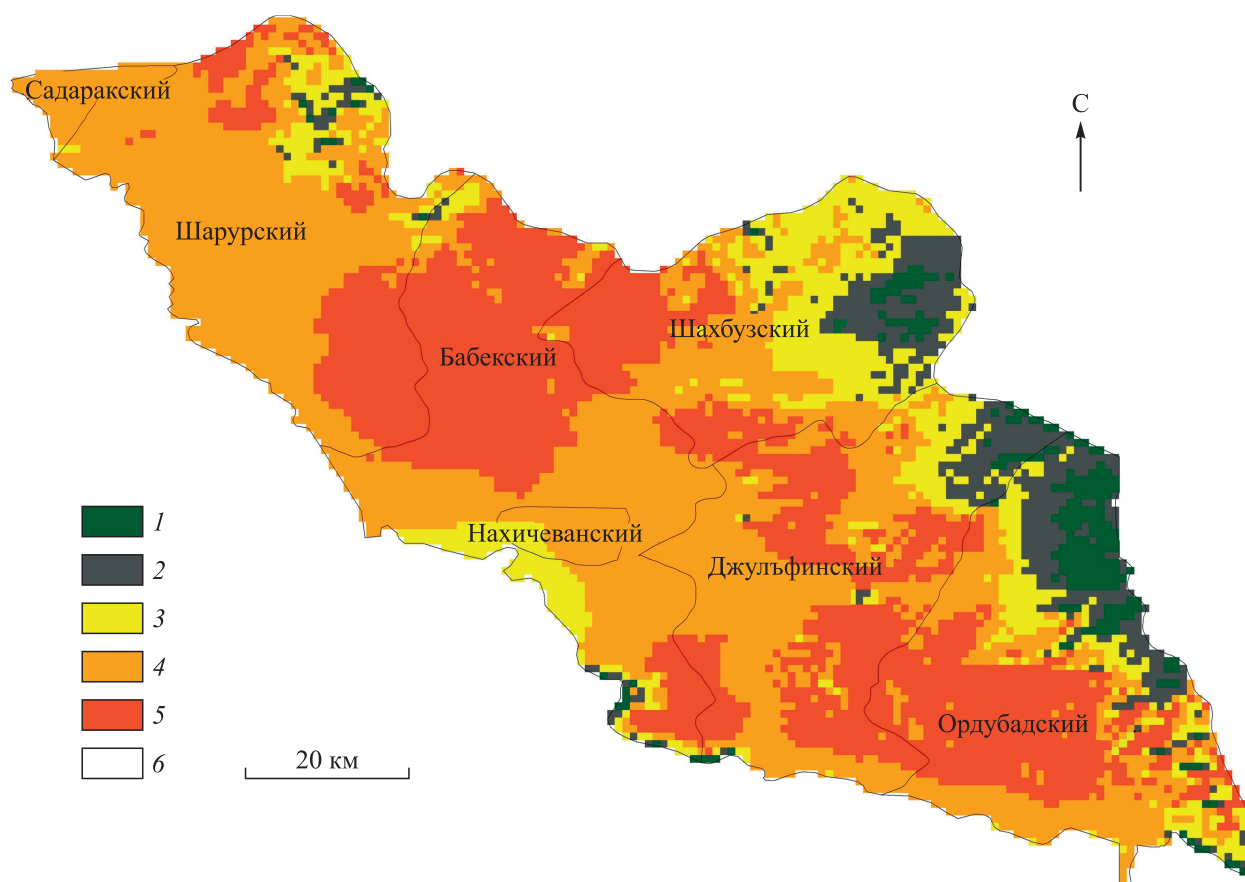


Рис. 3. Годовые показатели суммарной солнечной радиации Нахичеванской автономной республики [19, 20].

Солнечная радиация, кВт·ч/м² в год: 1 — 1,220–1,400, 2 — 1,401–1,450, 3 — 1,451–1,500, 4 — 1,501–1,600, 5 — 1,601–1,699. 6 — граница Нахичеванской автономной республики.

Как следует из метеорологической статистики — одного из наиболее важных параметров для эффективной работы ФЭ-станций — годовая продолжительность солнечного сияния в регионе составляет не менее 2470 ч, а среднегодовой горизонтальный уровень радиации на квадратный метр — 1460 кВт·ч (ежедневно — 4,35 кВт·ч/м²) (табл. 3; см. рис. 3). С использованием карты распределения годовой продолжительности солнечного сияния в Нахичевани подсчитано, что его средняя продолжительность равна 10,5 ч/сут. Чтобы солнечные электростанции работали эффективно, следует отдавать предпочтение областям с наименьшей облачностью, где продолжительность солнечного сияния составляет не менее 6,5 ч, а поток энергии уменьшается на 10–25 %.

Таблица 2

**Средние значения радиации, индекса прозрачности и температуры воздуха
в Нахичеванской автономной республике [19, 20]**

Фактор	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность, Вт·ч/м ²	92	132	180	226	271	307	306	283	235	163	107	83	199
Рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, Вт·ч/м ²	35	52	77	90	97	96	99	79	61	52	40	30	67
Индекс ясности атмосферы (K_T)	0,502	0,536	0,557	0,559	0,588	0,634	0,647	0,661	0,660	0,594	0,533	0,504	0,597
Температура воздуха, °C	–4,6	–0,3	5,9	10,6	15,3	20,3	24,0	24,4	19,3	13,2	5,4	–0,6	11,1

Еще один критерий выбора места установки — создание электростанции на минимальном расстоянии от потребителя. Более логично размещать станции вблизи сектора с большим спросом на электроэнергию: городских поселков, предприятий, промышленного производства и фабрик. Данные о линиях электропередач, трансформаторах, шоссе, пастбищах и сельскохозяйственных угодьях, собранные с соответствующих тематических карт и базы данных Open StreetMap, оценены для определения оптимального места для установки солнечной электростанции (рис. 4). Кроме того, при выборе следует учитывать подверженность районов проседанию почв, оползням, наводнениям и другим стихийным бедствиям. Такие территории должны находиться в пределах определенного диапазона буферных расстояний с оптимальными площадями [9].

Измеренные значения, характеризующие подкритерии и ограничения в рамках основных критериев для определения наиболее подходящих областей, подробно описаны в табл. 4. Здесь приведены ограничивающие факторы, расположенные по степени значимости. В то же время районы, где суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность (основной определяющий критерий)

Таблица 3

Продолжительность солнечного сияния и участки с уклоном до 4° (7 ‰) [21]

Районы	Размер поля, км ²	Продолжительность солнечного сияния, ч/год
Бабекский	92,6	1597
Шарурский	387,8	1470
Джюльфинский	287,9	1559
Ордубадский	198,7	1592
Шахбузский	218,6	1660
Садаракский	58,4	1475

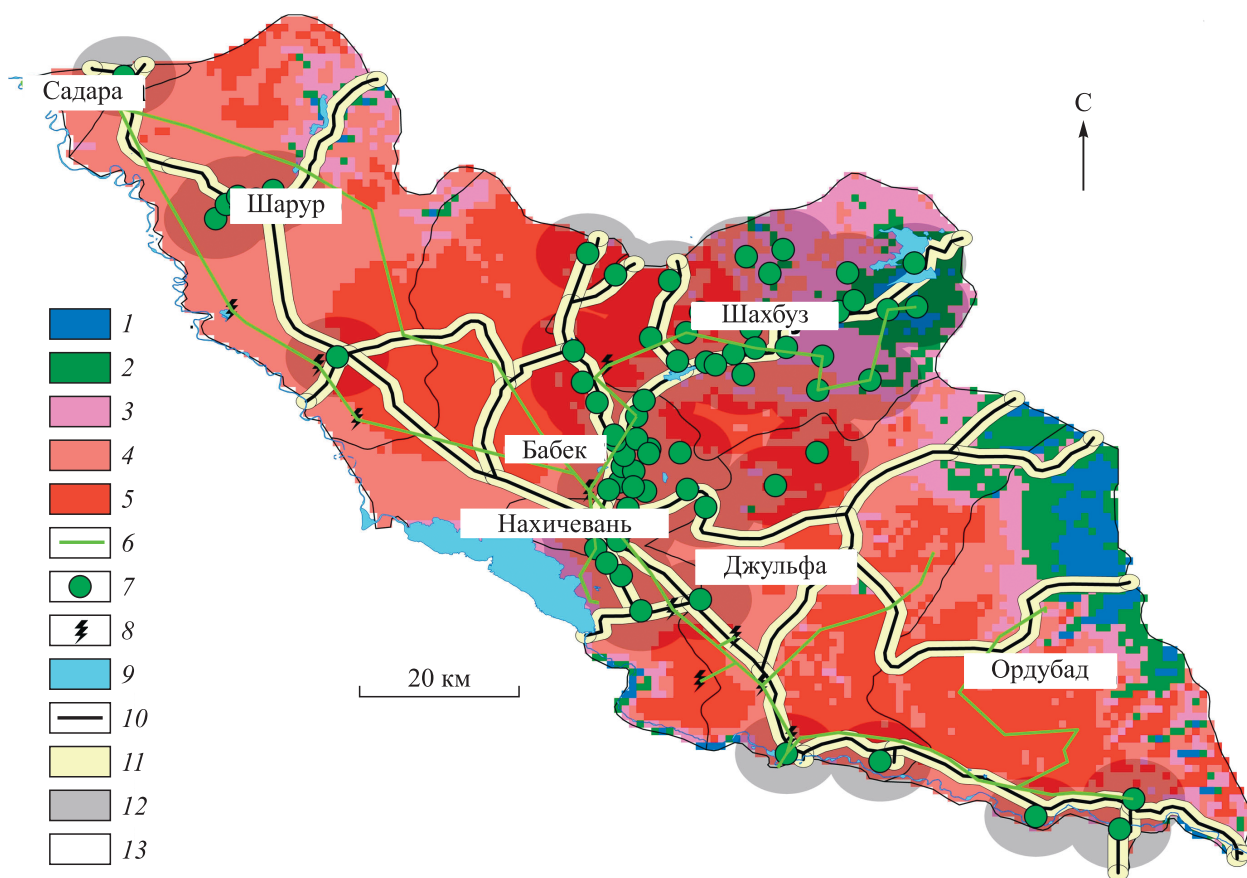


Рис. 4. Карта пригодности для установки солнечных электростанций на территории Нахичеванской автономной республики.

Общая солнечная радиация (на горизонтальной поверхности), кВт·ч/м² в год: 1 — 1,220–1,400, 2 — 1,401–1,450, 3 — 1,451–1,500, 4 — 1,501–1,600, 5 — 1,601–1,699. 6 — электрическая сеть; 7 — поселение; 8 — подстанция; 9 — резервуар; 10 — автомагистраль. Территории высокой пригодности (расстояние до объектов инфраструктуры, м): 11 — автомагистрали (0–1000), 12 — поселения (>2001). 13 — граница Нахичеванской автономной республики.

Таблица 4

Критерии выбора месторасположения для солнечных электростанций

Критерий	Подкритерий	Ограничение
Потенциал солнечной энергии	Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность	1350 кВт·ч/м ² в 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 почвы, серые почвы, серо-бурые почвы, почвы, 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
Транспорт	Расстояние до населенных пунктов	300–15000 м
Расстояние до охраняемых территорий	Расстояние до автодороги	300–500 м
Расстояние до охраняемых территорий	Национальные парки и заказник	
Расстояние до охраняемых территорий	Ручьи, озера, реки и т. д.	

ниже 1350 кВт·ч/м² в год, включены в категорию «непригодные» из-за низкой мощности производства энергии. Например, при суммарном излучении 1350 и 1500 кВт·ч/м² разница в выработке энергии солнечными панелями на площади 1000 м² составит примерно 17 000 кВт·ч/год (151 783 и 168 647 кВт·ч/год соответственно). Это определяется на основе формулы для расчета выхода солнечной энергии ФЭ-системы:

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot PR,$$

где E — произведенная электрическая энергия, кВт·ч; A — общая площадь солнечной панели, м²; r — КПД солнечной панели (15 %); H — радиация, приходящая на наклонную приемную поверхность панелей (затенение не включено); PR — коэффициент потерь (0,75). В зависимости от места, технологии и размера системы, эти 25 % потерь включают в себя: потери инвертора (6–15 %), временные потери (5–15 %), потери в кабеле переменного тока (1–3 %), потеря затенения (0–40 % в зависимости от участка), потери из-за слабого облучения (3–7 %), потери из-за пыли, снега (2 %) [23].

В регионе определены территории, соответствующие критериям, указанным в табл. 4, и в результате классификации их буферной дистанции создана тематическая карта в м-бе 1:500 000 (см. рис. 4). Она выполнена с помощью взвешенного наложения данных пространственного и метеорологического анализа региона с использованием инструмента переклассификации ArcGIS и модели процесса аналитической иерархии. Для определения буферного расстояния ограничительных областей использовались инструменты растрового изображения, инструменты расстояния на основе растра и инструменты евклидова расстояния (табл. 5). Установка солнечных электростанций вблизи жилых районов дает экономическое преимущество в плане 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 на карте это отражено 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. 4). В результате площадь всех определенных регионов рассчитана с помощью инструмента «взвешенное наложение» в среде ГИС с использованием метода АИП.

При выборе потенциальных территорий для развития солнечных электростанций необходимо также определить уклон и пригодность местности региона в соответствии с принципами их размещения. 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 районы Нахичеванской автономной 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 более затратна с экономической точки зрения [20]. Однако ряд технических процедур позволяет преобразовать ФЭ-панели для их размещения в доступных местах.

Установка солнечных электростанций третьей (1239 км²) и четвертой (1270 км²) категорий с уклоном 21–39 ‰ (12–20°) и 39–100 ‰ (20–45°) включает территории, проблематичные для использования солнечной энергии (рис. 5). Эти данные взвешиваются для всех регионов путем применения бинарной матрицы сравнения их критериев с использованием метода иерархии аналитических процессов (табл. 5).

Расстояние до подстанций и линий электропередач играет важную роль при выборе оптимального места для установки солнечных электростанций 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 [8]. Места, где расстояние до подстанции и электросети составляет менее 2000 м, считаются очень подходящими для установки солнечных электростанций, участки с дистанцией 2001–4000 м — средне подходящими, 4001–6000 м — менее подходящими, а более 6001 м — неподходящим (см. рис. 4). Общие значения индикаторов для всех областей с этими четырьмя различными значениями расстояний рассчитывались при помощи взвешенной модели АИП.

Наличие автомагистрали на территории, предназначенной для установки солнечной электростанции, считается экономическим критерием, так как позволяет избежать дополнительных расходов на транспортировку 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 [9]. Как показано на рис. 4, расстояние от 0 до 1000 м обозначено как хорошо подходящее, от 1001 до 3000 м — средне подходящее, от 3001 до 5000 м — плохо подходящее, от 7001 м и выше — непригодное.

Таблица 5

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

Основной критерий	Подкритерий	Индикатор	Среднее значение	Статус пригодности
Потенциал солнечной энергии	Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м ² в год	1220–1350	1285	Плохо подходящий
		1351–1500	1420	Средне подходящий
		1501–1699	1600	Хорошо подходящий
Топография (рельеф, склон, аспект)	Угол наклона солнечных панелей (южное направление)	Широта местности (38–40° с. ш.). Годовой фиксированный угол солнечных панелей (36, 37 и 38°)	Расчет угла, 38° × 0,87 + 3,1 = 36°	Подходящий
			39° × 0,87 + 3,1 = 37°	
			40° × 0,87 + 3,1 = 38°	
Климат	Уклон поверхности региона, ‰ (°)	7–21 (4–12)	14 (8)	Хорошо подходящий
		21–39 (12–20)	30 (16)	Средне подходящий
		39–100 (20–45)	60 (31)	Неподходящий
	Высота над уровнем моря (диапазон благоприятных климатических условий), м	750–965	850	Хорошо подходящий
		965–1200	1080	Средне подходящий
		≥1200	≥1200	Неподходящий
Электрическое подключение	Количество пасмурных дней в области (дней), ед.	65–75	70	Неподходящий
		55–65	60	Средне подходящий
		45–55	50	Хорошо подходящий
	Расстояние до ЛЭП, км	≤5	2,5	Хорошо подходящий
		6–10	8	Средне подходящий
		≥11	≥11	Неподходящий
Транспорт	Расстояние до подстанции, км	≤6	4	Хорошо подходящий
		7–12	8,5	Средне подходящий
		≥13	≥13	Неподходящий
	Расстояние до автомагистралей, км	≤2,5	1,25	Хорошо подходящий
		2,6–5	3,45	Средне подходящий
		≥5	3,60	Плохо подходящий

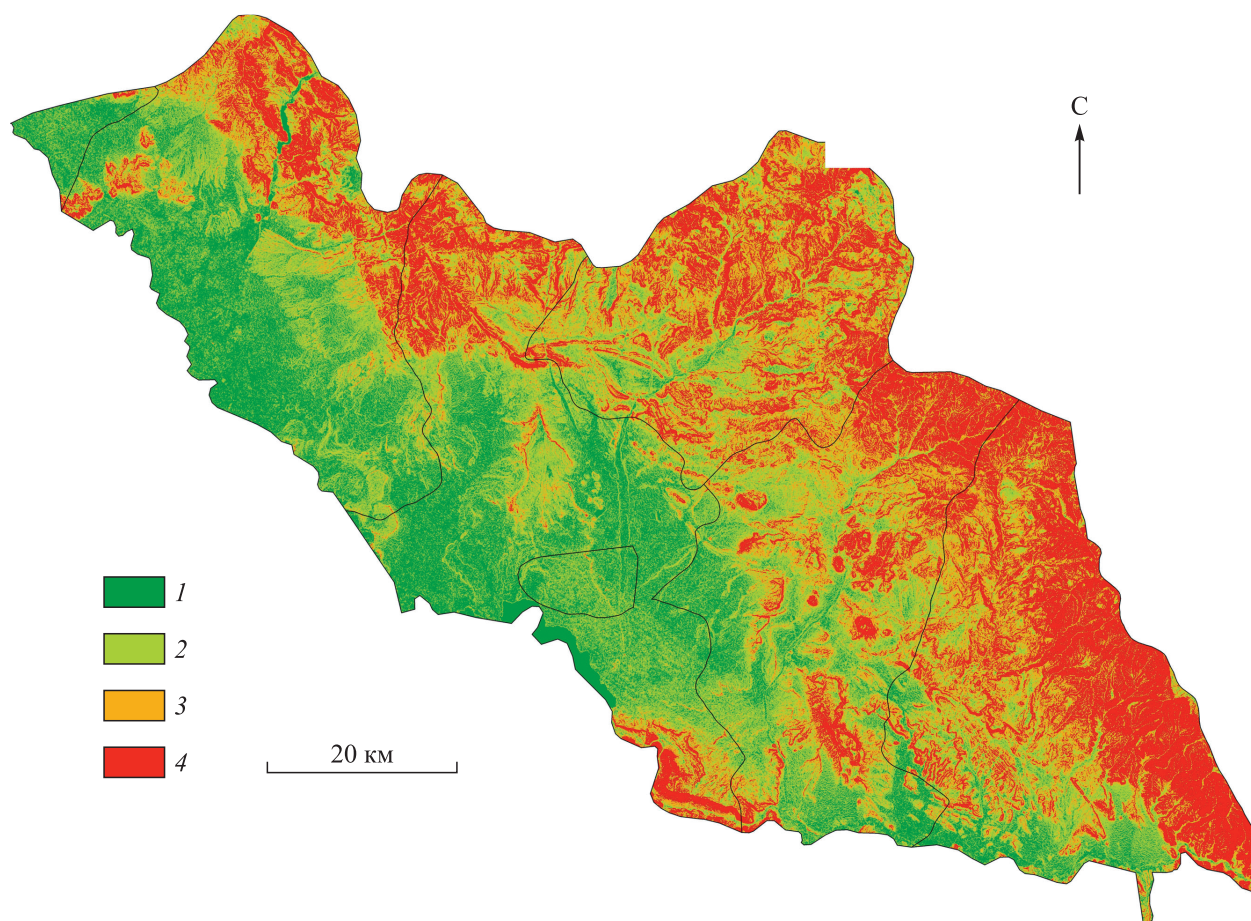


Рис. 5. Карта распределения уклонов по территории Нахичеванской Автономной Республики [24].

Уклон и площадь поверхности, %о (км²): 1 — 0–7 (1244), 2 — 7–21 (1786), 3 — 21–39 (1238), 4 — 39–100 (1276).

Проанализированы данные четырех основных критериев и 14 подкритериев, рассмотренных в исследовании. В модели АИП подходящие места, определенные путем применения матрицы парных сравнений, ранжированы по четырем категориям: от высокого до низкого. Коэффициент согласности парных сравнений рассчитан для проверки всех взвешенных значений СР. Определено, что он находится на уровне 0,08 (оценочное суждение 0,10). Затем, используя функцию моделирования оверлей в программном обеспечении ArcMap, взвешенные критерии добавлены к областям с высоким общим солнечным излучением на горизонтальной поверхности и определен уровень пригодности места для размещения солнечных фотоэлектрических станций. По общему количеству суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Нахичевани рассчитана возможность производства электроэнергии от фотоэлектрических панелей. Так, в Бабекском районе годовое значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность 1597 кВт·ч/м² и среднегодовое производство электроэнергии на 1 м² солнечной панели составит 180 кВт·ч (КПД 15 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования с использованием модели АИП в Нахичеванской автономной республике подходящие места для установки солнечных электростанций в районах с высокой суммарной солнечной радиацией на горизонтальную поверхность делятся на три категории: с высокой, средней и низкой пригодностью.

В результате взвешенного наложения определенных критериев с использованием инструмента ArcMap оверлей обнаружено, что 9,5 % (510 км²) территории региона наиболее пригодны 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. При этом 54,5 % исследуемой территории (2,930 км²) не соответствуют критериям выбора площадки (см. рис. 4). Основные причины этого — низкий суммарный уровень радиации, высокая степень облачности, наличие особо охраняемых природных территорий, плодородность почвы, плохая инфраструктура и непригодность рельефа местности.

Пространственные, метрологические, экологические и связанные с инфраструктурой показатели (солнечная радиация, уклон, землепользование, электросеть, транспорт), используемые для определения пригодности использования солнечной энергии в Нахичеванской АР, приведены в табл. 5. В результате анализа этих данных сделан вывод, что южные части Джульфинского, Ордубадского и Бабекского районов наиболее оптимальны для установки электростанций. Из общей площади 510 км², пригодной для размещения фотоэлектрических элементов, 109 км² расположены на Ордубадском районе, 98 км² — в Джульфинском, 124 км² — в Бабекском, 103 км² — в Шарурском и 76 км² — в Шахбузском районе.

В результате расчета на территории Нахичеванской АР можно построить солнечные фотоэлектрические станции общей мощностью 25 500 МВт на площади 510 км² (примерно 20 000 м² земли требуется для солнечной электростанции мощностью 1 МВт), которые могут вырабатывать 38,1 млрд кВт·ч электроэнергии в год, что примерно в 1,5 раза превышает общий объем производства электроэнергии в стране. Это придаст стратегическую значимость региону в плане обеспечения энергетической безопасности и сделает его экологически чистым. Кроме того, эффективное использование солнечной энергии позволит предотвратить глобальное потепление и загрязнение воздуха, сохранить здоровье жителей региона, а также поддержать экономический рост и повысить конкурентоспособность республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan G., Rathi S. Optimal site selection for solar PV power plant in an Indian state using geographical information system (GIS) // International Journ. of Emerging Engineering Research and Technology. — 2014. — Vol. 2 (7). — P. 260–266.
2. Mammadov F. Yearly average maps of solar radiation in Azerbaijan // Energy Power. — 2013. — Vol. 3. — P. 44–50.
3. 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 [Электронный ресурс]. — <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1504> (дата обращения 16.10.2020).
4. Linkov I., Moberg E. Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. — Boca Raton: CRC Press, 2011. — 179 p.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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). — P. 643.
9. 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.
10. 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.
11. Merrouni A.A., Elalaoui F.E., Mezrhah 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.
12. Devi K., Yadav S.P. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for plant location selection with ELECTRE method // The Internat. Journ. of Advanced Manufacturing Technology. — 2013. — Vol. 66 (9–12). — P. 1219–1229.
13. 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, Part B: Economics, Planning, and Policy. — 2015. — Vol. 10 (3). — P. 241–249.
14. Quijano R., Dominguez J., Botero S. Sustainable energy planning model (MODERGIS) application to integrate renewable energy in the Colombia case [Электронный ресурс]. — <https://www.researchgate.net/publication/258121696> (дата обращения 16.10.2020).

15. **Глобальный** солнечный атлас [Электронный ресурс]. — <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.609193,8.4375,3> (дата обращения 19.10.2020).
16. **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.
17. **Saaty T.L.** The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. — New York: McGraw, 1980. — 214 p.
18. **Pohekar S.D., Ramachandran M.** Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning — a review // *Renew Sustain Energy Rev*. — 2004. — Vol. 8. — P. 365–81.
19. **Global Solar Atlas 3.0**, Azerbaijan, Nakhchivan Autonomy Republic, Solar energy resource, 2020 [Электронный ресурс]. — https://globalsolaratlas.info/map?r=AZE:AZE.7_1&c=39.30579,45.4625,9 (дата обращения 09.08.2020).
20. **Solargis**, Solar resource maps of Azerbaijan [Электронный ресурс]. — <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/azerbaijan> (дата обращения 17.08.2020).
21. **Babayev S.** Geography Nakhchivan Autonomous Republic. — Baku: Elm, 1999. — 227 p.
22. **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.
23. **Solar energy output**, Simulation and design of solar systems [Электронный ресурс]. — <https://photovoltaicsoftware.com/principle-ressources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (дата обращения 19.10.2020).
24. **Earth Data Search**, ASTER Global Digital Elevation Model V003 [Электронный ресурс]. — <https://search.earth-data.nasa.gov/search/?hdr=1%20to%2030%20meters&fi=ASTER&fst0=Land%20Surface> (дата обращения 12.09.2020).

Поступила в редакцию 26.10.2020

После доработки 10.06.2021

Принята к публикации 29.12.2021