

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СРЕДЕ ГИС ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРОВИНЦИИ ХОМС, СИРИЯ

Научная статья

Солиман Х.^{1,*}, Бурлов В.Г.², Украинцева Д.А.³

¹ORCID : 0000-0003-2595-0646;

³ORCID : 0000-0001-6769-5669;

^{1,2,3} Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (hassansoliman2233[at]gmail.com)

Аннотация

Изучение и оценка возобновляемых источников энергии вносит свой вклад в процесс государственного регионального планирования на энергетическом уровне и помогает в выявлении слабых сторон инфраструктуры изучаемого региона (электроэнергетическая сеть, дорожная сеть). В статье используется метод нечеткой логики для оценки ветровых ресурсов в районе исследования, а также описывается и развивается метод многокритериального анализа наряду с нечеткой логикой. При проведении исследования были направлены экономические, экологические и технические критерии, в дополнение к связанным с ними подкритериям, чтобы найти наиболее подходящие места для ветровых электростанций, исключить неподходящие участки и рассчитать теоретический потенциал электрической энергии. Результат исследования показал, что 6% площади исследуемого района пригодны для развития ветропарков, а анализ чувствительности свидетельствует о том, что экономические критерии, особенно критерий электрической сети, существенно ограничивают использование и инвестиции энергии ветра на территории провинции Хомс.

Ключевые слова: геоинформационная система (ГИС), нечеткая логика, нечеткий Метод Анализа Иерархии (НМАИ), ветряные электростанции.

THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN A GIS ENVIRONMENT FOR THE SELECTION OF WIND FARM LOCATIONS ON THE EXAMPLE OF HOMS PROVINCE, SYRIA

Research article

Soliman H.^{1,*}, Burlov V.G.², Ukraintseva D.A.³

¹ORCID : 0000-0003-2595-0646;

³ORCID : 0000-0001-6769-5669;

^{1,2,3} Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (hassansoliman2233[at]gmail.com)

Abstract

The study and evaluation of renewable energy sources contributes to the state regional planning process at the energy level and helps in identifying weaknesses in the infrastructure of the region in question (power grid, road network). The article uses a fuzzy logic method to evaluate wind resources in the studied area, and describes and develops a multi-criteria analysis method in addition to fuzzy logic. The research focused on economic, environmental and technical criteria, together with related sub-criteria, to find the most suitable locations for wind power plants, exclude unsuitable ones and calculate the theoretical potential of electrical energy. The result of the study showed that 6% of the area is suitable for the development of wind power plants, and the sensitivity analysis shows that the economic criteria, especially the electric grid criteria, significantly limit the use and investment of wind energy in the province of Homs.

Keywords: geographic information system (GIS), fuzzy logic, Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), wind power plants.

Введение

Энергия является движущей силой экономики и промышленности стран по всему миру, и хотя ископаемые виды топлива являются основным источником энергии в мире, они являются ограниченной и неустойчивой энергией в дополнение к их негативному воздействию на окружающую среду. Энергия ветра в настоящее время является одним из наиболее широко используемых возобновляемых источников энергии, и она быстро растет и становится коммерчески привлекательной для производства электроэнергии, так что энергия, вырабатываемая ветряными турбинами, стала конкурентоспособной с энергией из ископаемого топлива. В изучаемой области ископаемые виды топлива в течение многих лет играли важную роль в обеспечении энергией, что привело к чрезмерному изучению их местонахождений по сравнению с исследованием и изучением доступных мест для возобновляемых источников энергии. В настоящее время страна в целом испытывает острую нехватку энергоносителей в результате ухода многих нефтегазовых направлений из-под контроля государства, стремящихся всеми силами использовать потенциал возобновляемых источников энергии. В глобальных исследованиях в этой области все исследования подтверждают, что районы, которые содержат высокий потенциал скорости ветра и солнечной радиации, не всегда являются наиболее подходящими местами для создания ветряных или солнечных электростанций, и факторы, влияющие на эффективность этих электростанций должны быть изучены [1]. В Китае темпы производства электроэнергии на ветряных электростанциях снизились из-за совокупности факторов. Во-первых, противоречие между строительством

быстрорастущих ветровых электростанций и строительством незавершенной электросети. Во-вторых, пространственное несоответствие между центрами ветрогенерации и регионами с высокой электрической нагрузкой. В-третьих, неправильное геологическое расположение привело к негативным последствиям для оси баланса турбины, что привело к шуму, который повлиял на жизнь жителей, и, таким образом, к возникновению сопротивления со стороны общества и государственных органов проектам ветряных электростанций [2]. Из вышеизложенного делаем вывод о важности проведения научного планирования и оценки целесообразности размещения ветропарков для обеспечения устойчивого экономического развития ветроэнергетики.

Для решения задач, связанных с пространственным размещением ветровых электростанций, во многих исследованиях использовался многокритериальный анализ в среде ГИС, например, в районе Нью-Йорка использовались ГИС и многокритериальный пространственный анализ с учетом экономических факторов изучаемой территории [3]. Метод НМАИ использовался в Греции в попытке найти наиболее подходящие места для ветряных электростанций [4]. В Колорадо, США, различные параметры, такие как градиент, скорость ветра, плотность населения и расстояние от дорог, были использованы и сохранены в базе данных в виде растровых слоев, и был выполнен процесс наложения, чтобы определить наиболее подходящие места для ветряных электростанций [5]. В Индии теоретический энергетический потенциал, ожидаемый от ветряных электростанций, был рассчитан с использованием иерархического анализа, основанного на теории Саати [1]. В исследовании, проведенном в Иране, исследователи подчеркнули важность использования НМАИ при использовании многокритериального анализа для ветряных электростанций, чтобы преодолеть факторы слабости метода МАИ, и в исследовании сделан вывод о том, что создание ветряных электростанций без учета экономических факторов, особенно электрической сети, приведет к тому, что стоимость строительства опор и линий электропередач превысит стоимость ветряной электростанции [6].

Возвращаясь к исследуемой территории, провинция Хомс, Сирия, мы отмечаем недостаточное применение этих методов в области возобновляемых источников энергии, отсюда и необходимость проведения такого исследования. Поэтому в рамках исследования собранные данные будут сначала преобразованы в нечеткие данные, а затем обработаны взвешиванием слоев с использованием многокритериального нечеткого иерархического анализа и, наконец, сбором слоев посредством процесса наложения. Исследование сможет помочь лицам, принимающим решения в Сирии, при создании новых ветряных электростанций.

Методы и принципы исследования

В человеческом мышлении и языке мы часто используем неточные или расплывчатые понятия, где наше мышление и язык не бинарны, то есть не черное и белое, ноль и единица, да или нет, в реальной жизни существует множество вариаций и степеней различия в наших суждениях и классификациях. Эти расплывчатые или неопределенные понятия, которые мы называем двусмысленными, мы можем встретить почти везде в нашей повседневной жизни. В геоинформационных системах мы пытаемся представить реальный мир в виде группы слоев и классифицируем все явления по определенным категориям, чтобы понять эти явления и изучить отношения между их различными элементами, и, как и все в нашей жизни, многие географические явления содержат степень неясности и неопределенности, которую невозможно выразить классическими группами с четкими границами, географические объекты часто не имеют четких границ, а некоторые понятия, такие как большие, малые, соответствующие и несоответствующие, лучше выражены степенью принадлежности к расплывчатой группе, чем к классическому методу классификации.

Процесс выбора участка, также называемый анализом пригодности, представляет собой тип анализа, проводимого ГИС для определения наилучшего участка в соответствии с набором условий и критериев. Использование нечеткой логики в качестве метода анализа наложения слоев является очень важным инструментом для решения проблем, возникающих из традиционных приложений анализа наложения, таких как выбор оптимального местоположения и подгонка моделей. Основная предпосылка, от которой зависит нечеткая логика, заключается в том, что существует неточность в позиционных данных и геометрической структуре пространственных данных, поскольку нечеткая логика предоставляет метод обработки всех видов точного подсчета [7].

На выбор подходящих участков для создания ветряных электростанций влияет ряд факторов (экономических, экологических и технических), поэтому первым шагом в этом исследовании является сбор данных, связанных с этими факторами, и их классификация по группам. Второй шаг заключается в применении нечеткой логики и использовании функций нечетких отношений для создания новых слоев, имеющих значения от 0 до 1, так что число 0 представляет области, которые не подходят для создания ветряных электростанций, а число значение 1 представляет наиболее подходящие области для их создания. Последним шагом является использование процесса нечеткого иерархического анализа для определения весов слоев на основе предыдущих исследований и мнений экспертов в области возобновляемых источников энергии, а также применение процесса взвешенной наложения для получения желаемого конечного результата. Факторы, влияющие на производительность и эффективность ветровых электростанций, были разделены на три группы: социально-экологические, экономические и технические факторы.

Социально-экологические факторы

В этой части кратко рассматриваются различные социально-экологические условия, которые должны быть выполнены при проведении анализа и которые влияют на принятие решений относительно выбора площадок для ветряных электростанций, и они заключаются в следующем:

- Выбранное место должно находиться вдали от водоемов (водохранилища, плотины и озера) и водотоков [1].
- Ветроэлектростанции должны располагаться на большом удалении от аэропортов и военных зон из-за негативного влияния ветропарков на деятельность авиации, включая помехи сигналам полетных радаров, отвлечение внимания пилотов и т.д. [1].

– Ветряные электростанции должны быть установлены на значительном расстоянии от заповедников дикой природы, где ветряные турбины могут убивать летающих в воздухе животных, оставляя долгосрочные последствия для всей пищевой цепи [8].

– Землепользование: Установка энергетического проекта требует тщательной оценки имеющихся земель (бесплодные или редкорастущие, мозаика пахотных земель/луг, засушливые пастбища, пастбища и кустарники считаются «очень подходящими» категориями. Точно так же леса, вечнозеленые широколиственные леса, смешанные леса, снег или лед, лесистые водно-болотные угодья, сельскохозяйственные участки, городские и застроенные земли считаются неподходящими) [9], [10], [11];

– Большое расстояние от городских районов необходимо, чтобы избежать беспокойства, визуального вторжения среди бела дня и шума, нарушающего жизнь человека, а также для будущего развития городов [12], [13].

Экономические факторы

Включают факторы, влияющие на экономику ветряных электростанций: расстояние от электросети, расстояние от дорог. Ветряные электростанции должны находиться рядом с основными дорогами и электросетями. (Большие расстояния приводят к необходимости прокладки новых линий электропередач и дорог, что приводит к дополнительным затратам по проекту [6]);

Технические факторы:

– Средняя скорость ветра является важным критерием для определения технической возможности размещения ветряных электростанций. Критерий скорости ветра был включен почти в каждое исследование [14], [15]. В текущей исследовательской работе изучается скорость ветра на высоте 100 м не менее 3 м/с, а районы со скоростью ветра более 6 м/с считаются «чрезвычайно подходящими» [1].

– Цифровая модель рельефа (ЦМР) использовалась для построения карты уклонов исследуемой области в процентах, и участки с уклоном менее 30% были приняты в качестве подходящих мест для ветровых электростанций. Аналогичным образом для определения высоты использовалась ЦМР, а поскольку эффективность использования энергии ветра снижается по мере уменьшения плотности воздуха на больших высотах, в качестве максимально допустимой высоты для строительства ветропарков было выбрано 2000 м [6].

После получения необходимых данных и сохранения их в базе данных будет использоваться нечеткая логика для преобразования данных внутри слоев в нечеткие данные, которые будут подготовлены на основе функций принадлежности, определяющих степень принадлежности каждого элемента со значением в диапазоне от 0 до 1. Фаззификацию можно выполнить, используя множество возможных алгебраических формул для органических функций, таких как гауссовы, синусоидальные, сигмоидальные, непрерывные функции и т. д. Поскольку неоднозначность — это процесс разложения входных и/или выходных данных системы на одну или несколько нечетких групп, тригонометрические или трапециевидные функции принадлежности обычно предпочтительнее из-за простоты их математической обработки. На рисунке.1 представлена типичная трапециевидная органическая функция, которая будет использоваться в настоящей статье. Каждое нечеткое множество охватывает область входного (или выходного) значения, нанесенного на график с принадлежностью. Любая данная запись из этой неоднозначной группы интерпретируется, и рассчитывается оценка членства [16].

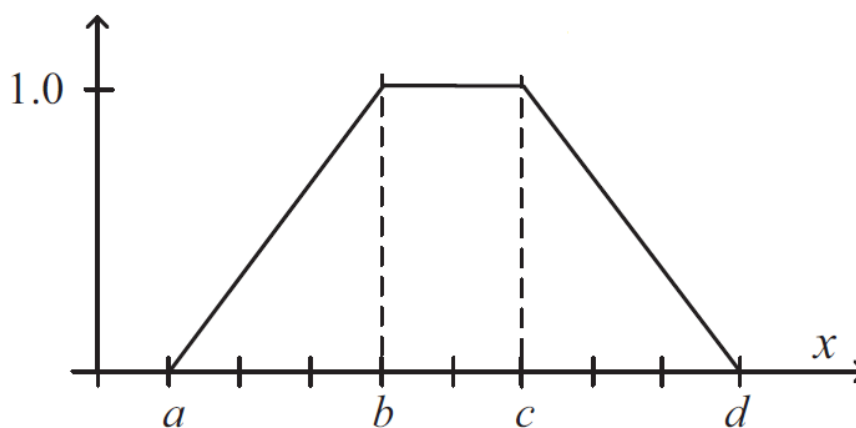


Рисунок 1 - Трапециевидная функция принадлежности

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.1>

Уравнение (1) является простой и понятной реализацией, использующей только прямые вычисления, которые могут быть реализованы на любом языке программирования или в программах ГИС.

$$\mu(x, a, b, c, d) = \text{MAX}[\text{MIN}(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0] \quad (1)$$

После подготовки соответствующих функций принадлежности в соответствии с требуемыми классами критериев и подготовки соответствующих классов в соответствии с новыми значениями классификации, которые варьируются от нуля до единицы, наступает этап придания веса критериями, и в данном исследовании для получения весов будет использован метод нечеткого иерархического анализа (НМАИ). Метод иерархического анализа (МАИ), первоначально сформулированный Томасом Саати [17] в 1980 году, был единодушно применен учеными, исследователями и лицами,

принимающими решения, как надежный и точный инструмент для решения сложных проблем принятия решений. МАИ помогает лицам, принимающим решения, глубже изучить детали как объективных, так и субъективных аспектов проблемы. По сути, МАИ имеет три основных этапа, прежде чем прийти к окончательному выводу: организация сложных проблем в виде иерархии целей, альтернатив и критериев оценки альтернатив, взаимно однозначное сравнение альтернатив на каждом шаге иерархии по каждому критерию на предыдущем уровне, а затем, наконец, вертикальное построение матрицы принятия решений по нескольким уровням иерархии. Основная проблема использования простого МАИ – это неопределенность, предвзятость и расплывчатость мнений экспертов. Недостаток человеческих суждений можно решить с помощью теории нечетких множеств (НМАИ), разработанной Заде [18]. Метод НМАИ использует концепции теории нечетких множеств и анализа иерархической структуры для более точного и систематического решения сложной задачи принятия решений, чем простой метод МАИ [19], [20]. По сути, метод НМАИ представляет собой разработку стандартного метода МАИ в нечеткой области с использованием для расчета нечетких чисел вместо действительных чисел, как продемонстрировано Petkovic et al. [21]. Нечеткий аналитический иерархический процесс (НМАИ) объединяет теорию нечетких чисел с базовым аналитическим иерархическим процессом (МАИ) для решения сложных проблем принятия решений. Поскольку базовый МАИ не учитывает ошибки, возникающие из-за предубеждений и нечеткости личных суждений, он был изменен и улучшен путем объединения его с подходом нечеткой логики. В НМАИ как альтернативы, так и критерии сравниваются друг с другом попарно через лингвистические переменные, которые могут быть представлены в виде треугольных чисел [22], как показано в таблице 1.

Таблица 1 - Определение масштаба НМАИ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.2>

Шкала АНР	Шкала(F-АНР)	Определение
1	(1,1,1)	Равное значение
3	(2,3,4)	Умеренная важность
5	(4,5,6)	Сильное значение
7	(6,7,8)	Очень большое значение
9	(9,9,9)	Чрезвычайная важность
2	(1,2,3)	Промежуточные значения
4	(3,4,5)	
6	(5,6,7)	
8	(7,8,9)	

Методология НМАИ, разработанная Бакли [23], будет использоваться в текущем исследовании благодаря ее точности, гибкости и надежности. Процесс присвоения весов каждому критерию состоит из пяти общих шагов, а именно:

Шаг 1: каждый критерий или альтернатива сравнивается с остальными элементами с помощью лингвистических терминов, как показано в таблице 1, и соответствующие нечеткие треугольные числа присваиваются в соответствии с этими лингвистическими терминами. Например, если эксперт утверждает, что Критерий 1 (K1) является достаточно важным (более важным), чем Критерий 2 (K2), то K12 будет иметь нечеткую треугольную шкалу (4, 5, 6), тогда как K21 будет представлять важность K2 по K1 получат нечеткую треугольную шкалу как (1/6, 1/5, 1/4) и так далее для остальных критериев или альтернатив. Таким образом, может быть подготовлена квадратная матрица нечетких треугольных масштабов, показанная в уравнении (2). Следует отметить, что K_{ij} представляет относительную важность i -го критерия по j -му критерию через нечеткие треугольные числа. Здесь очень важно отметить, что на протяжении всего остального исследования знак «тильда (\tilde{e})» будет отличать нечеткое треугольное число от простого целого числа:

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} \tilde{K}_{11} & \dots & \tilde{K}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \tilde{K}_{n1} & \dots & \tilde{K}_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Шаг 2: среднее геометрическое FTN «z», как объяснил Бакли [23], может быть оценено с помощью уравнения (3):

$$\tilde{z}_{iJ} = [\prod_{j=1}^n \tilde{t}_{ij}]^{1/n} \quad (3)$$

Шаг 3: относительные веса каждого критерия можно оценить как неоднозначное число, используя следующее уравнение:

$$\tilde{w}_i = \tilde{z}_i \oplus [\sum_{j=1}^n \tilde{z}_{iJ}]^{-1} = (l_i, m_i, u_i) \quad (4)$$

Шаг 4: до сих пор все веса критериев по-прежнему будут нечеткие треугольные числа, поэтому их необходимо дефазифицировать с помощью метода центра области, предложенного Чоу и Чангом [24] (уравнение (5)):

$$A_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (5)$$

Шаг 5: хотя на данном этапе A_i не является нечетким числом, все критерии должны быть нормализованы с помощью уравнения (6):

$$W_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6)$$

В этом исследовании применялась нечеткая логика посредством использования пространственных нечетких отношений для обработки данных, полученных для изучаемой области провинции Хомс, которая находится в центре Сирии, её площадь – 42 223 квадратных километров, и она является крупнейшей провинцией в Сирии. Провинция Хомс разделена на 6 административных округов (районов). Расположение провинции Хомс гарантирует, что она получает мягкое влияние и бриз Средиземноморья. В провинции Хомс умеренный климат со средним количеством осадков 18 дюймов (460 мм), кроме того, в провинции самая высокая скорость ветра в Сирии [25].

Результаты исследования

Целью исследования является поиск идеальных мест для ветряных электростанций в соответствии с набором критериев с использованием нечеткой логики вместо классической или традиционной логики. В качестве области исследования была выбрана провинция Хомс в Сирии, и, как и во всех других методах выбора сайтов, нечеткая логика использует методологию рабочего процесса. Методология выбора оптимального участка в данном исследовании в рамках геоинформационной системы выглядит следующим образом:

а) Собираение слоев данных, соответствующие критериям, и введение их в геоинформационные системы. В рамках программы (ARCGIS 10.6) была построена база данных и введены все слои, необходимые для проведения работы (Таблица 2 показывает собранные критерии).

Таблица 2 - Сбор данных и их источники

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.3>

Критерий	Данные	Описание	Источник
K1	Скорость ветра	Субъект содержит скорость ветра на высоте 100 м над уровнем поверхности.	Global Wind Atlas [26]
K2	Уклон	Получено из высотной цифровой модели.	Earth explorer [27]
K3	Электрической сети	Линии электропередачи.	Каталог World Bank Data [28]
K4	Высота	Получено из высотной цифровой модели.	Earth explorer [27]
K5	Основные дороги	Различные государственные автомагистрали, железные дороги.	Данные OpenStreetMap [29]
K6	Землепользование	Сельскохозяйственные и земли, покрытые лесом.	Esri Land Cover [30]
K7	Городские районы	Охватывает сельские и городские районы Хомса.	Данные OpenStreetMap [29]
K8	Важные области	Он охватывает национальные и международные аэропорты и военные зоны.	Данные OpenStreetMap [29]
K9	Водотоки	Охватывает реки, каналы и озера.	HydroSHEDS [31]
K10	живая природа	Национальные парки, строгие заповедники.	Данные OpenStreetMap [29]

б) Определение функций нечеткой принадлежности: этот этап выполняется для того, чтобы облегчить чтение данных, хранящихся в матричной форме, путем замены исходных значений нечеткими значениями. После применения нечеткой логики получаем слои содержат элементы со значениями от нуля до единицы. Чтобы выполнить первое условие, которое представляет скорость ветра, скорость ветра меньше 3 будет исключена и получит нулевое значение, а скорости ветра больше 6 будет присвоено значение 1, а значения между 3 и 6 будут рассчитываться как значение степени принадлежности. Для остальных критериев применялся тот же процесс, что показано в таблице 3, а на рисунках 2-4 показаны слои критериев после применения нечетких операций.

Рисунок 2 - Функции нечеткой принадлежности используемых критериев

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.4>

Критерий	Нечеткая функция	Нечеткая функция для критерии
K1 (m/s)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 3 \\ \frac{x-3}{3}, & 3 \leq x < 6 \\ 1, & x \geq 6 \end{cases}$
K2 %	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < 15 \\ \frac{30-x}{15}, & 15 \leq x < 30 \\ 0, & x \geq 30 \end{cases}$
K3 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ \frac{2-x}{1}, & 1 \leq x < 2 \\ 0, & x \geq 2 \end{cases}$
K4 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 0.4 \\ \frac{x-0.4}{0.6}, & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 1, & x \geq 0.6 \end{cases}$
K5 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 7 \\ \frac{x-7}{3}, & 7 \leq x < 10 \\ 1, & x \geq 10 \end{cases}$
K6 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ \frac{x-5}{2}, & 5 \leq x < 7 \\ 1, & x \geq 7 \end{cases}$
K7 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 10 \\ \frac{20-x}{10}, & 10 \leq x < 20 \\ 1, & x \geq 20 \end{cases}$
K8 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ \frac{10-x}{5}, & 5 \leq x < 10 \\ 1, & x \geq 10 \end{cases}$
K9 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 3 \\ \frac{x-3}{3}, & 3 \leq x < 6 \\ 1, & x \geq 6 \end{cases}$
K10 (km)	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 3 \\ \frac{x-3}{3}, & 3 \leq x < 6 \\ 1, & x \geq 6 \end{cases}$

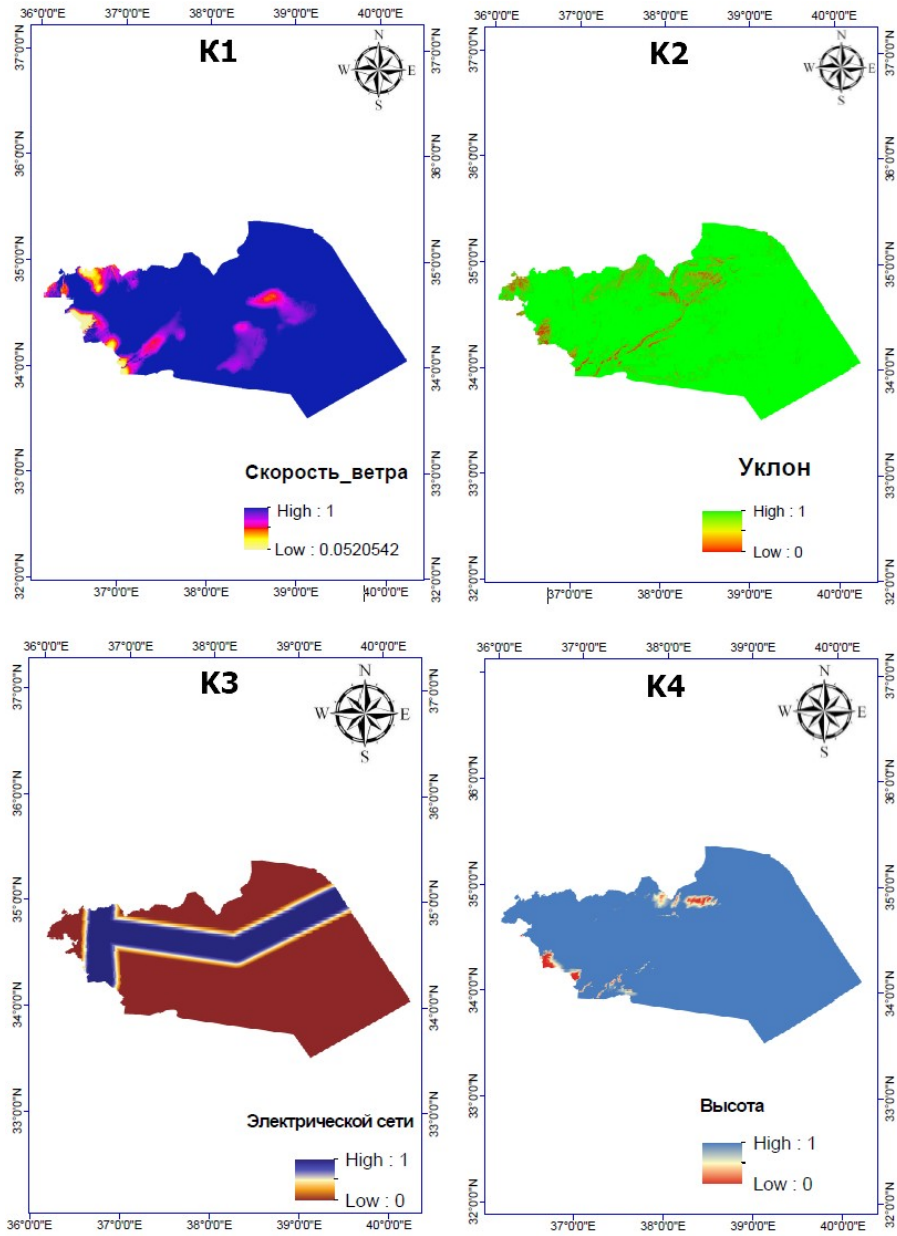


Рисунок 3 - Слои 1-4, полученные в результате применения нечетких функций принадлежности
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.5>

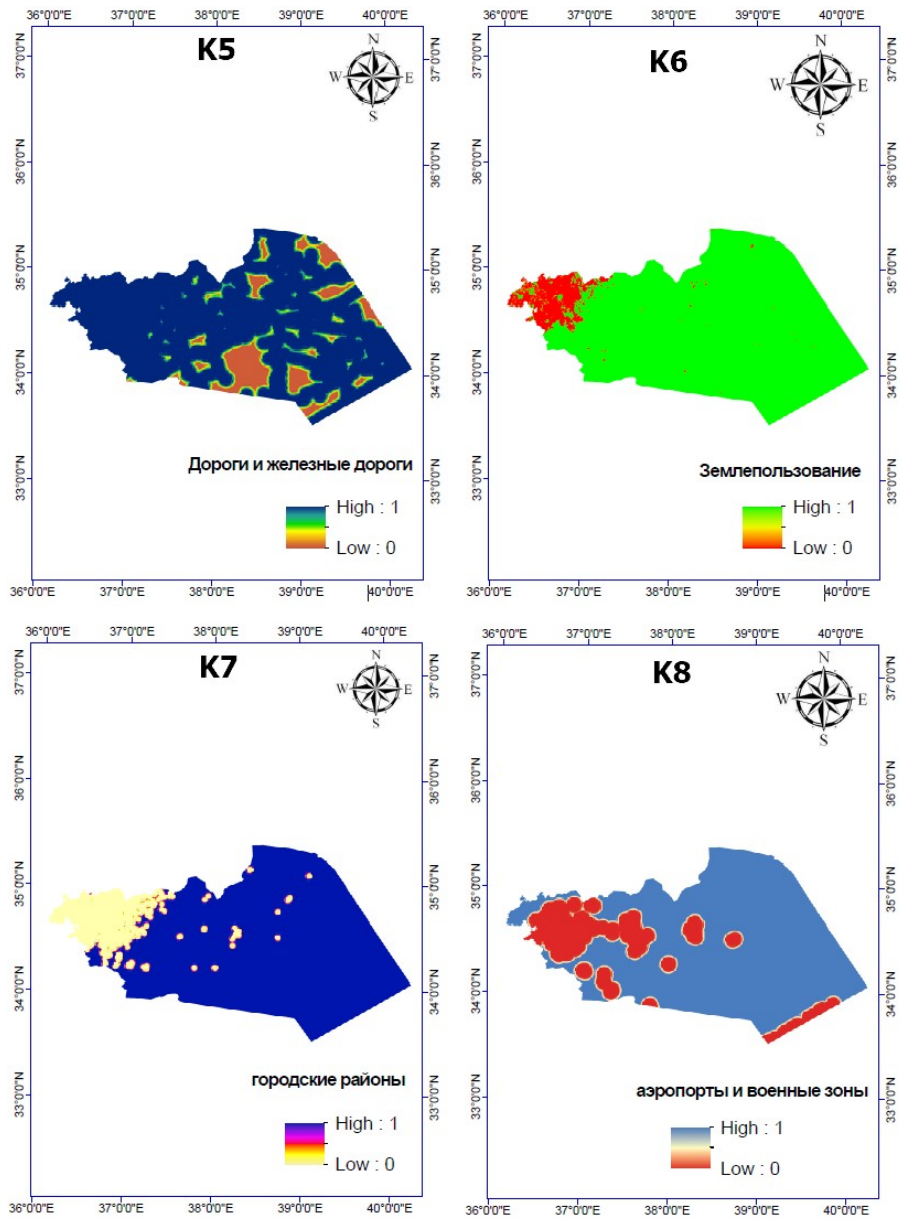


Рисунок 4 - Слои 5-8, полученные в результате применения нечетких функций принадлежности
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.6>

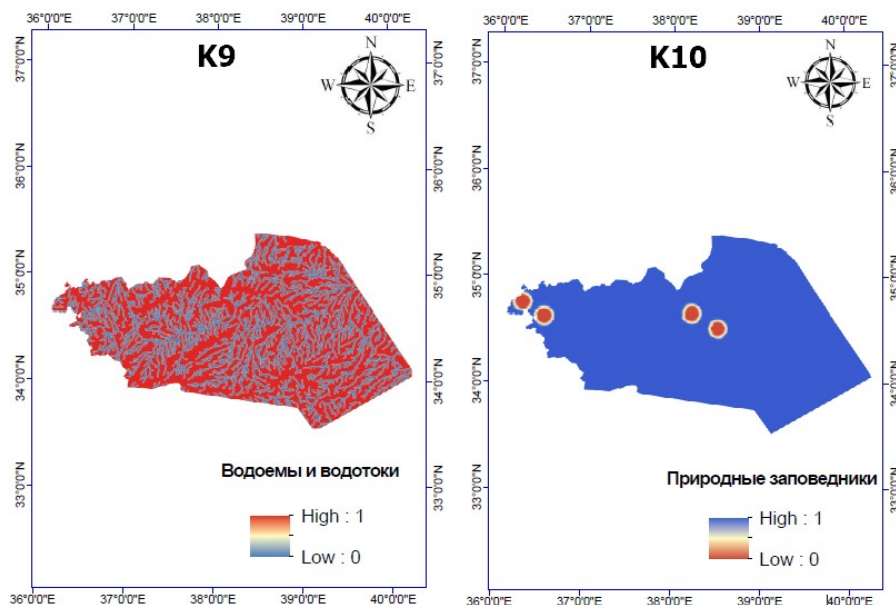


Рисунок 5 - Слои 9-10, полученные в результате применения нечетких функций принадлежности
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.7>

в) Применение взвешенного нечеткого наложения (НМАИ): взвешенное нечеткое наложение позволяет накладывать слои, классифицированные по функциям принадлежности, с целью анализа возможности достижения набора условий.

После подготовки соответствующих функций принадлежности по слоям требуемых критериев и подготовки соответствующих слоев по новым значениям классификации, которые колеблются от нуля до единицы, было применено нечеткое взвешивание с использованием процесса НМАИ, и поскольку для создания подходящих карт для ветровых электростанций очень важно систематизированно и комплексно задать вес по каждому критерию, для этого экспертам в области возобновляемой энергетики и ветроэнергетики было предложено заполнить неоднозначные таблицы попарных сравнений (таблице 1) для всех критериев по степени пригодности, показанная в таблице 4.

Таблица 3 - Нечеткие сравнения по каждому критерию

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.8>

	к1	к2	к3	к4	к5	к6	к7	к8	к9	к10
к1	1,1,1	2,3,4	1,3,1	4,5,6	3,4,5	2,3,4	3,4,5	2,3,4	5,6,7	7,8,9
к2	1/4,1/3, 1/2	1,1,1	1,2,3	4,5,6	3,4,5	2,3,4	2,3,4	3,4,5	5,6,7	5,6,7
к3	1/4,1/3, 1/2	1/3,1/2, 1	1,1,1	4,5,6	3,4,5	4,5,6	2,3,4	2,3,4	4,5,6	3,4,5
к4	1/6,1/5, 1/4	1/6,1/5, 1/4	1/6,1/5, 1/4	1,1,1	1,1,1	1,2,1	1,1,1	2,3,4	2,3,4	2,3,4
к5	1/5,1/4, 1/3	1/5,1/4, 1/3	1/5,1/4, 1/3	1,1,1	1,1,1	1,2,1	1,3,1	1,3,1	1,5,1	1,4,1
к6	1/4,1/3, 1/2	1/4,1/3, 1/2	1/6,1/5, 1/4	1/3,1/2, 1	1/3,1/2, 1	1,1,1	1,2,1	1,3,1	1,5,1	1,3,1
к7	1/5,1/4, 1/3	1/4,1/3, 1/2	1/4,1/3, 1/2	1,1,1	1/3,1/3, 1/2	1/3,1/2, 1	1,1,1	1,2,1	1,4,1	1,5,1
к8	1/4,1/3, 1/2	1/5,1/4, 1/3	1/4,1/3, 1/2	1/4,1/3, 1/2	1/4,1/3, 1/2	1/4,1/3, 1/2	1/3,1/2, 1	1,1,1	1,5,1	1,3,1
к9	1/7,1/6, 1/5	1/7,1/6, 1/5	1/6,1/5, 1/4	1/4,1/3, 1/2	1/6,1/5, 1/4	1/6,1/5, 1/4	1/5,1/4, 1/3	1/6,1/5, 1/4	1,1,1	1,2,1
к10	1/9,1/8, 1/7	1/7,1/6, 1/5	1/5,1/4, 1/3	1/4,1/3, 1/2	1/5,1/4, 1/3	1/4,1/3, 1/2	1/6,1/5, 1/4	1/4,1/3, 1/2	1/3,1/2, 1	1,1,1

Используя уравнение (1), было рассчитано нечеткое среднее геометрическое всех параметров, которые перечислены в таблице 5.

Таблица 4 - Геометрические средние нечетких чисел

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.9>

К	а	б	с
к1	2,694	3,542	4,349
к2	1,974	2,653	3,347
к3	1,692	2,227	2,908
к4	0,719	0,919	1,116
к5	0,909	1,189	1,488
к6	0,671	0,933	1,335
к7	0,645	0,845	1,141
к8	0,47	0,615	0,871
к9	0,245	0,307	0,388
к10	0,237	0,294	0,398
СУММА	10,26	13,52	17,34
1/ СУММА	0,098	0,074	0,058
ПОРЯДОК	0,058	0,074	0,098

После этого для каждого критерия вычисляются верхняя и нижняя границы неоднозначных весов, которые приведены в таблице 6.

Таблица 5 - Нечеткие веса для всех критериев

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.10>

Шсi	l	m	i
к1	0,1554	0,2619	0,424
к2	0,1139	0,1962	0,326
к3	0,0976	0,1647	0,284
к4	0,0415	0,068	0,109
к5	0,0524	0,0879	0,145
к6	0,0387	0,069	0,13
к7	0,0372	0,0625	0,111
к8	0,0271	0,0455	0,085
к9	0,0141	0,0227	0,038
к10	0,0136	0,0217	0,039

На последнем этапе был проведен процесс демистификации весов и преобразования их в однозначные относительные веса путем взятия среднего значения нечетких чисел для каждого параметра (Таблица 7):

Таблица 6 - Окончательный относительный вес для каждого критерия

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.11>

Шсi	Ai	Wi
к1	0,2804	0,2563
к2	0,2121	0,1939
к3	0,1819	0,1663
к4	0,0728	0,0665
к5	0,0951	0,087
к6	0,0793	0,0725
к7	0,0703	0,0643
к8	0,0525	0,048
к9	0,0249	0,0228
к10	0,0247	0,0226

Из вышеизложенного мы получаем набор весов со значениями от 0 до 1, так что чем ближе вес к единице, тем важнее условие и наоборот. Эти веса использовались для выполнения процесса взвешенного наложения для всех слоев, и в итоге получаем карту (см. рисунок 5), на которой отмечены все оптимальные места размещения ветровых станций, соответствующие требуемым критериям.

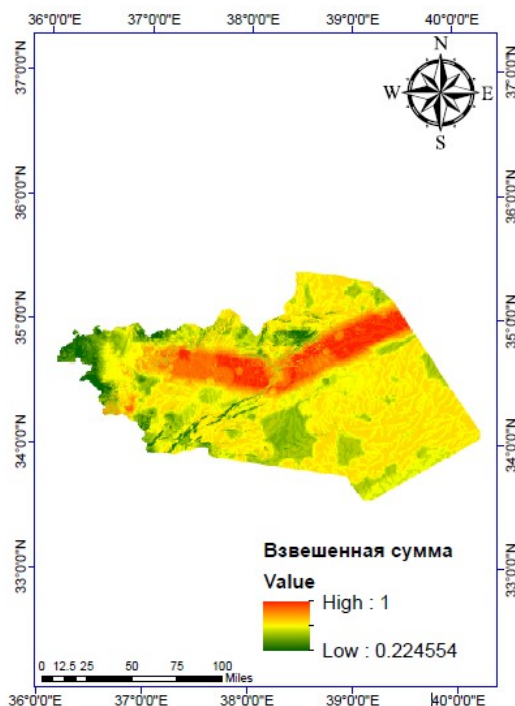


Рисунок 6 - Карта пригодности ветряных электростанций
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.12>

Результат исследования показывает, что пригодные участки для инвестирования ветровых электростанций расположены по центральной части изучаемой территории, а площадь этих участков составляет (6603,503 км²), что составляет 6% от площади изучаемого района(см. рисунок 6), и анализ чувствительности, который был проведен путем удаления фактора электрической сети и повторного анализа, показывает значительное увеличение доли земли, пригодной для инвестиций, до 60%, и поэтому мы можем сделать вывод, что исследуемая территория очень подходит для инвестиций в области энергии ветра, но фактор электрической сети является одним из главных препятствий, мешающих инвестированию энергии ветра, и это связано с высокой стоимостью, необходимой для создания новых сетей электропередачи, стоимость которых может быть выше, чем стоимость создания поле ветряных турбин.

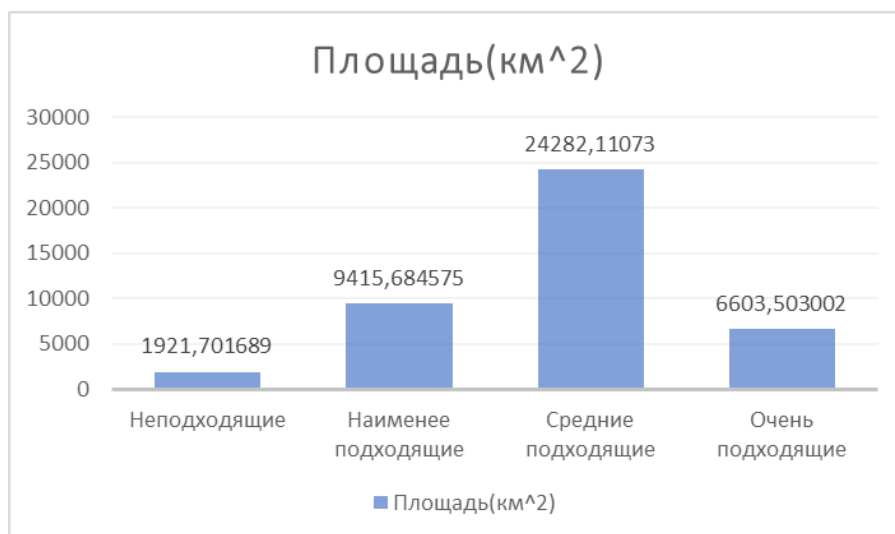


Рисунок 7 - Разделение земельной территории провинции Хомс по разным шкалам пригодности ветропарков
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.13>

Теоретический потенциал ветровой энергии может быть рассчитан на основе генерирующей мощности ветряных турбин, диаметра ротора и доступных общих наиболее подходящих земельных участков (Таблица 8). Уравнение (7) можно использовать для расчета теоретического потенциала ветровой энергии [32], [33].

$$T = TA \times AF \quad (7)$$

где T – теоретический потенциал ветровой энергии (ГВт), TA — это общая доступная высоко подходящая земельная площадь (км²), AF — коэффициент площади (МВт/км²). В данном исследовании ветрогенераторы располагались на расстоянии $7D \times 5D$, где D — диаметр ротора. Теоретическая энергия была рассчитана для турбины (WD2.5-103) производства в Сирии компании WDRVM, имеющей диаметр 103 метра [34].

Таблица 7 - Теоретический потенциал ветроэнергетики на подходящих участках

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.14>

Производитель	Модель ветряной турбины	Диаметр ротора (м)	Мощность (МВт)	7D×5D (Площадь) км ²	Коэффициент площади (МВт/км ²)	Теоретический потенциал ветроэнергетики (ГВт)
WDRVM	WD2.5-103	103	2,5	0,371	6,738	44,494

Заключение

В этом исследовании был представлен и разработан новый метод выбора наиболее подходящих участков для ветряных электростанций по нескольким критериям, основанный на методе нечеткой логики в среде ГИС. Этот метод позволил представить данные, аналогичные их присутствию в реальном мире, и с помощью этого метода был выполнен процесс взвешенного нечеткого наложения. Этот метод был применен в провинции Хомс, Сирия, где в рамках программы (ARCGIS 10.6) были построены геоинформационные системы и все данные, необходимые для анализа, были подготовлены в матричной форме.

Результат исследования показал, что 6% земель изучаемого региона пригодны для развития в области ветроэнергетики, а фактор электрических сетей является одним из самых важных факторов, ограничивающих хорошие инвестиции в ветроэнергетику. Текущие исследования предлагают работать над поддержкой инфраструктуры электрической сети и строительством специальных линий электропередачи для возобновляемых источников энергии, поскольку этот вид энергии имеет переменную частотную нагрузку в течение дня и года.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.15>

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.17.15>

Список литературы на английском языке / References in English

1. Saraswat S.K. MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India / S.K. Saraswat, A.K. Digalwar, S.S. Yadav et al. // *Renewable Energy*. – 2021. – № 169. – P. 865-884.
2. Xu Y. Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision making method in Wafangdian, China / Y. Xu, Y. Li, L. Zheng et al. // *Energy*. – 202. – № 207. – P. 118-222.
3. Van Haaren R. GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State / R. Van Haaren, V. Fthenakis // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2011. – № 15(7). – P. 3332-3340.
4. Latinopoulos D. A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece / D. Latinopoulos, K. Kechagia // *Renewable Energy*. – 2015. – № 78. – P. 550-560.
5. Janke J.R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado / J.R. Janke // *Renewable Energy*. – 2010. – № 35(10). – P. 2228-2234.
6. Moradi S. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran / S. Moradi, H. Yousefi, Y. Noorollahi et al. // *Energy Strategy Reviews*. – 2020. – № 29. – P. 100478.
7. Lehner B. New global hydrography derived from spaceborne elevation data / B. Lehner, K. Verdin, A. Jarvis // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2008. – № 89(10). – P. 93-94.
8. How do wind farms affect bats birds and other wildlife. – URL: <https://www.bbc.com/future/article/20200302-how-do-wind-farms-affect-bats-birds-and-other-wildlife> (accessed: 15-02-2022).
9. Giamalaki M. Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach / M. Giamalaki, T. Tsoutsos // *Renewable Energy*. – 2019. – № 141. – P. 64-75.
10. Tahri M. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: case study in southern Morocco / M. Tahri, M. Hakdaoui, M. Maanan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – № 51. – P. 1354-1362.

11. Gorsevski P.V. A group-based spatial decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio / P.V. Gorsevski, S.C. Cathcart, G. Mirzaei et al. // *Energy Policy*. – 2013. – № 55. – P. 374-385.
12. Azizi A. Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran / A. Azizi, B. Malekmohammadi, H.R. Jafari et al. // *Environmental monitoring and assessment*. – 2014. – № 186. – P. 6695-6709.
13. Ali S. GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand / S. Ali, J. Taweekun, K. Techato et al. // *Renewable Energy*. – 2019. – № 132. – P. 1360-1372.
14. Jangid J. Potential zones identification for harvesting wind energy resources in desert region of India e a multi criteria evaluation approach using remote sensing and GIS / J. Jangid, A.K. Bera, M. Joseph et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – № 65. – P. 1-10.
15. Höfer T. Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen / T. Höfer, Y. Sunak, H. Siddique et al. // *Applied energy*. – 2016. – № 163. – P. 222-243.
16. Simões M.G. Artificial Intelligence for Smarter Power Systems: Fuzzy Logic and Neural Networks / M.G Simões // *IET*. – 2021. – № 161. – P. 83.
17. Saaty T.L. How to make a decision: the analytic hierarchy process / T.L Saaty // *European journal of operational research*. – 1994. – № 24(6). – P. 19-43.
18. Zadeh L.A. Fuzzy Sets / L.A Zadeh // *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems*. – 1996. – № 8. – P. 394-432.
19. Ruoning X. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment / X. Ruoning, Z. Xiaoyan // *Fuzzy sets and Systems*. – 1992. – № 52(3). – P. 251–257.
20. Cheng C.H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function / C.H. Cheng // *European journal of operational research*. – 1997. – № 96(2). – P. 343-350.
21. Petkovic J. Application of fuzzy AHP method for choosing a technology within service company / J. Petkovic, Z. Sevarac, M.L. Jaksic et al. // *Technics technologies education management-TTEM*. – 2012. – № 7(1). – P. 332-341.
22. Kilincci O. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. / O. Kilincci, S. A. Onal // *Expert systems with Applications*. – 2011. – № 38(8). – P. 9656-9664.
23. Buckley J.J. Fuzzy Hierarchical Analysis / J.J. Buckley // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1985. – № 17. – P. 233-247.
24. Chou S.W. The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits / S.W. Chou, Y. C.Chang // *Decision support systems*. – 2008. – № 46(1). – P. 149-157.
25. Homs province. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Homs> (accessed: 14.01.2022).
26. The Global Wind Atlas 3.0, T.U.o. Denmark, Editor. 2019. – URL: <https://globalwindatlas.info/> (accessed: 16.12.2021).
27. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 10.12.2021).
28. World Bank. Syrian Arab Republic – Electricity Transmission Network. 2017. – URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=SY> (accessed: 12.10.2021).
29. OpenStreetMap, OpenStreetMap data licensed under the Open Database 1.0 License. 2022. – URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/35.0232/36.6641> (accessed: 12.10.2021).
30. Esri Land Cover. – URL: <https://livingatlas.arcgis.com/landcover/> (accessed: 16.01.2022).
31. Lehner B. New global hydrography derived from spaceborne elevation data/ B. Lehner, K. Verdin, A. Jarvis // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2008. – № 89(10). – P. 93-94.
32. Anwarzai M. A. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis / M.A. Anwarzai, K. Nagasaka // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – № 71. – P. 150-160.
33. Bina S.M. A comprehensive approach for wind power plant potential assessment, application to northwestern Iran / S.M. Bina, S. Jalilinasrabad, H. Fujii et al. // *Energy*. – 2018. – № 164. – P. 344-358.
34. The Wind Power. – URL: https://www.thewindpower.net/manufacturer_en_221_wdrvm.php (accessed: 18.01.2022).