

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 556—573.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 556—573.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК [502.174.3:551.556.3]:[004.922+001.891.573](591.1)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573

Оценивание морского ветроэнергетического потенциала на сирийском побережье на основе математического моделирования в среде ГИС

***Хасан Солиман¹, Дарья Андреевна Карпенкова (Украинцева)¹,
Вячеслав Георгиевич Бурлов¹, Анастасия Алексеевна Домостроева²***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, Россия, hassansoliman2233@gmail.com.

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия, adoostroeveva@mail.ru.

Аннотация. Настоящее исследование рассматривает оценку возможности создания оффшорных ветровых электростанций у побережья Сирии и подбор наиболее подходящих мест для создания таких ферм на основе использования математических методов и нечеткой логики, которая является одним из методов искусственного интеллекта. Метод реализации предлагаемого подхода основан на аналитической иерархии, нечеткой логике и взвешенном наложении, связанном с пространственной оценкой местоположения в ГИС. На основе предыдущих исследований и местных требований в Сирии был разработан набор соответствующих критериев, включая туристические места, глубину морской воды, скорость ветра, морские пути сообщения, маршруты судов и другие критерии.

Ключевые слова: геоинформационная система (ГИС), нечеткая логика, нечеткий метод анализа иерархии (НМАИ), морские ветровые электростанции.

Для цитирования: Солиман Х., Карпенкова (Украинцева) Д. А., Бурлов В. Г., Домостроева А. А. Оценивание морского ветроэнергетического потенциала на сирийском побережье на основе математического моделирования в среде ГИС // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 556—573. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573.

Original article

Assessment of offshore wind energy potential on the Syrian coast based on mathematical modeling in a GIS environment

***Hasan Soliman¹, Daria A. Karpenkova (Ukraintseva)¹,
Vyacheslav G. Burlov¹, Anastasiia A. Domostroeva²***

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Summary. The government in the Syrian Arab Republic seeks to increase reliance on alternative energy as a strategic objective to support the electrical network and has issued several laws that help investors to invest in this field. The current study aims to assess the feasibility of establishing offshore wind farms off the Syrian coast and determine the most appropriate sites for establishing such farms, using mathematical methods and fuzzy logic, which is one of the methods of artificial intelligence that can be applied within the GIS environment. A new methodology has been proposed to accurately assess the potential of offshore wind energy in the Syrian coast, and this methodology has the potential to be applied in other studies. The method of implementing this study is based on analytic hierarchy, fuzzy logic and weighted overlay associated with spatial assessment of location in GIS. Based on previous studies and local requirements in Syria, a set of appropriate criteria has been developed, including tourist places, sea water depth, wind speed, marine communication lines, ship itineraries and other criteria. Layers of these parameters were created in Raster format within GIS, and then converted into fuzzy data and collected by weighted linear overlay. The results of the study showed that most of the Syrian coasts are not suitable for investment in the field of offshore wind energy, due to the low wind speed in some offshore areas and the presence of areas with great depths of water that make it difficult to build turbines. However, the current study was able to identify some suitable areas for offshore wind farms, especially in the northern areas of the Syrian coast adjacent to Lattakia Governorate, these areas produce an energy of 3,1 GW of electrical energy.

Keywords: Geoinformation System (GIS), fuzzy Logic, Fuzzy-Hierarchy Analysis Method (F-AHP), Offshore Wind Farms (OWF).

For citation: Soliman H., Karpenkova (Ukraintseva) D. A., Burlov V. G., Domostroeva A. A. Assessment of offshore wind energy potential on the Syrian coast based on mathematical modeling in a GIS environment. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 556—573 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573.

Введение

Развитие оффшорной ветроэнергетики в последнее десятилетие набрало обороты по причине ее большей мощности по сравнению с наземной ветровой энергетикой и более высоких скоростей ветра на море. Морские ветровые электростанции (МВЭ), расположенные у береговой линии, ближе к более крупным нагрузкам, избегают необходимости передачи энергии на более дальнее расстояние, где расположены обычные электростанции. Кроме того, они относительно дороги, и их финансирование является «тяжелым бременем» для инвесторов, однако высокая генерирующая мощность делает их привлекательными по сравнению с наземными ветровыми электростанциями [1, 2]. Первые оффшорные ветровые электростанции производились в Дании и Нидерландах мощностью

менее 1 МВт из-за их высокой стоимости и технических трудностей. Великобритания и страны Северной Европы являются пионерами оффшорной ветроэнергетики, их текущая выработка превышает 7 ГВт. Китай и США планируют к 2030 году достичь 30 ГВт и 54 ГВт оффшорной ветроэнергетики соответственно [3, 4].

Морские ветровые установки должны учитывать вопросы устойчивости на ранних этапах планирования. Оценка мест, процесс установки, эксплуатация и связанные с этим воздействия имеют решающее значение для устойчивого развития этой технологии [5, 6]. МВЭ должны быть интегрированы в структуру управления морской территорией, посредством которой любая морская ветряная установка включается в регулируемую систему распределения [7]. Эта схема позволяет выбрать наиболее подходящие места, избегая основных ограничений [8], т.е. воздействия на окружающую среду, морскую деятельность, использование прибрежной зоны и неотъемлемых ценностей общества в отношении прибрежных регионов [9].

В настоящее время не существует рекомендаций по реализации этих ограничений в системе поддержки принятия решений, которая обычно основана на географических информационных системах (ГИС) [10, 11]. Разработка и внедрение моделей на основе ГИС может решить проблемы, связанные с потребностью в морском пространстве. В результате этого негативные воздействия будут сведены к минимуму, а устойчивость и прибыльность морского ветра станут максимальными [12, 13]. Тем не менее, доступная литература не дает прямых оценок исследований, проводимых для ГИС в области морского ветра, а также согласованности этих исследований с текущим состоянием дел. Поэтому существующая научная лакуна не позволяет оценить соответствующий выбор площадок для МВЭ, что обуславливает актуальность данного исследования, ориентированного на использование современных технологий.

Цель данной работы состоит в оценивании возможностей создания МВЭ у побережья Сирии с использованием математических методов и нечеткой логики, которая является одним из методов искусственного интеллекта. Полученные результаты позволили разработать новую модель определения мест размещения ветровых электростанций. Эта гибридная модель критериев ГИС использует количественное представление каждого критерия, уменьшая неопределенность и облегчая использование систем поддержки принятия решений для определения пригодности местоположения. Применение модели продемонстрировано на примере побережья Сирии (рис. 1).

Методика исследования

Управление природными ресурсами требует своевременной и надежной информации, доступной на местном, региональном, национальном и глобальном уровнях. Геоинформатика вместе с дистанционным зондированием, глобальными спутниковыми навигационными системами и сопутствующими технологиями представляет собой мощный инструмент управления природными ресурсами,

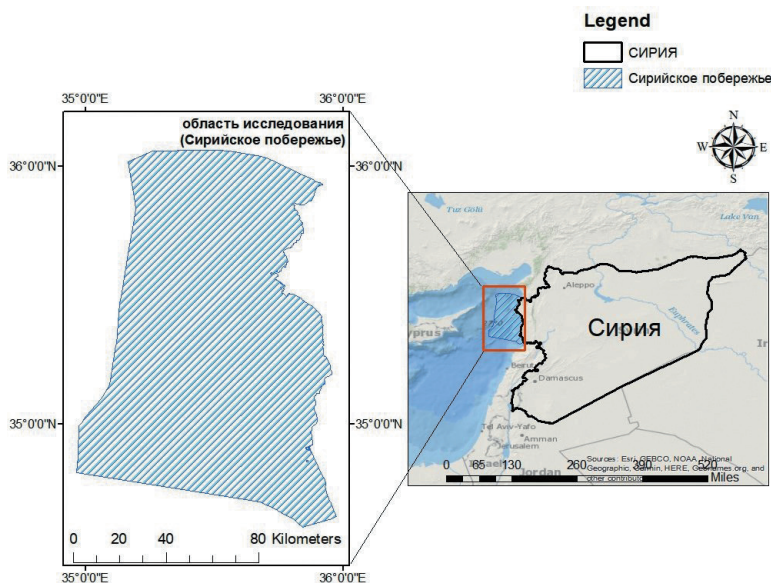


Рис. 1. Карта исследуемой территории сирийского побережья.

Fig. 1. Map of the study area representing the Syrian coast.

защиты окружающей среды и поддержки устойчивого развития. Быстрый рост рынка ветровой и солнечной энергии привел к возникновению множества новых проблем, наиболее важной из которых является управление расположением ферм возобновляемой энергии в соответствии с землепользованием.

Управление возобновляемыми источниками энергии в настоящее время сталкивается с рядом проблем, включая возрастающую сложность задач, постоянные изменения, неточные географические данные и динамические процессы, связанные с экономической ситуацией. В этих условиях интеллектуальные возможности лица, принимающего решение, часто вступают в противоречие с большим объемом необходимой географической информации, что приводит к затруднению принятия соответствующего решения. В качестве действенного способа повышения эффективности управления возобновляемыми источниками энергии следует построить методологию принятия решений на основе математических методов на всех уровнях работы. В этом случае компьютер выступает мысленным помощником лица, принимающего решения. Чтобы дать компьютеру возможности мышления, необходимо реальную административную или экономическую задачу заменить математическими моделями, а интуицию человека — моделью предпочтений [14, 15, 16].

Многокритериальное принятие решений (МКПР) на основе ГИС является наиболее эффективным методом определения пространственного расположения ветровых электростанций [17]. ГИС МКПР — это технология, используемая для принятия решений по пространственным вопросам, которая имеет множество

критериев и широко используется при пространственном планировании. В текущем исследовании ГИС использовалась для отображения, анализа и обработки географических данных с учетом комплекса экономических, социальных и экологических критериев исследуемой территории.

Подход, принятый в текущем исследовании, оценивает все наборы данных, которые влияют на расположение морских ветровых электростанций. Эти наборы содержат следующие критерии:

1) Критерий скорости ветра (k_1), который напрямую связан с производством энергии и финансовой отдачей от инвестиций в области оффшорной ветроэнергетики. Он используется для оценки пространственной пригодности площадок ветровых электростанций, на которых среднегодовая скорость ветра, необходимая для эффективной работы турбин, должна составлять не менее 6 метров в секунду на высоте 100 метров [18, 19].

2) Индекс глубины воды (k_2), имеющий значительное техническое и экономическое значение, поскольку чем больше глубина воды, тем выше стоимость строительства, обслуживания, управления и передачи электроэнергии [20, 21].

3) Критерий охраняемых территорий (k_8), согласно которому морские ветровые электростанции должны располагаться вдали от аэропортов и военных объектов из-за помех, которые они создают для радиолокационных систем.

4) Критерий толщины морских отложений (k_5), который может сделать район непригодным для потенциальных инвестиций в морские ветровые электростанции, поскольку этот критерий значительно увеличивает стоимость создания проекта [22, 23].

5) Критерий удаленности от путей судоходства судов, включенных в глобальные оценки (k_4), которые были получены из карт перевозки грузов Европейской сети морского мониторинга.

6) Критерий удаленности от подводных коммуникационных кабелей (k_9).

Кроме того, следует учитывать социально-экономические параметры, которые включают:

1) близость к национальной электрической сети для преодоления дополнительных затрат, связанных с установкой новых линий электропередачи (K_3) [20];

2) удаленность от туристических зон, поскольку это оказывает негативное визуальное и звуковое воздействие на морские туристические зоны (K_7);

3) близость к гаваням для снижения затрат на установку и строительство морских ветряных электростанций (K_6) [24, 25].

После сбора необходимых данных и сохранения их в базе критерии были разделены на две группы признаков: по ограничениям и факторам.

Ограничения помогают типизировать рассматриваемые альтернативы, позволяют удалить те регионы из набора регионов-кандидатов, которые не удовлетворяют требованиям. Ограничения представляются в виде логической карты. Исключенным из рассмотрения регионам присваивается признак 0, а тем, которые удовлетворяют условиям исследования, присваивается признак 1. Фактор — это критерий, который повышает или снижает степень пригодности конкретной альтернативы к рассматриваемым условиям (табл. 1) [26].

Таблица 1

Факторы, необходимые для размещения оффшорных ветровых электростанций [26]

Factors required for the location of offshore wind farms [26]

Кри- терий	Данные	Тип	Нечеткая функция	Запретный предел	Допусти- мый предел	Единица измерения (расстояние*)
K1	Скорость ветра	$\bar{\mu}$	Возрастание	4	8	м/с
K2	Глубина воды	$\underline{\mu}$	Убывание	500	20	м
K3	Электрическая сеть	$\underline{\mu}$	Убывание	50	30	км*
K5	Толщина отложений	$\underline{\mu}$	Убывание	3	2	м
K6	Порты	$\underline{\mu}$	Убывание	21	7	км*
K8	Охраняемые территории	$\underline{\mu}$	Возрастание	7	21	км*

Для преобразования данных факторов в нечеткие данные, используются нечеткие функции принадлежности, которые устанавливают степень принадлежности каждого элемента со значением в диапазоне от 0 до 1. Фазификацию, представляющую собой преобразование физических переменных в нечеткие множества и соответствующие им функции принадлежности, можно выполнить, используя множество возможных алгебраических формул для таких функций, как гауссовы, синусоидальные, сигмоидальные, непрерывные функции и т.д. Поскольку нечеткий процесс — это процесс разложения входных и/или выходных данных системы на одну или несколько нечетких групп, тригонометрические или трапецевидные функции принадлежности обычно предпочтительнее из-за простоты их математической обработки.

На рис. 2 представлена типичная трапецевидная функция принадлежности, которая будет использоваться в настоящей статье. Каждое нечеткое множество охватывает область входного (или выходного) значения, нанесенного на график

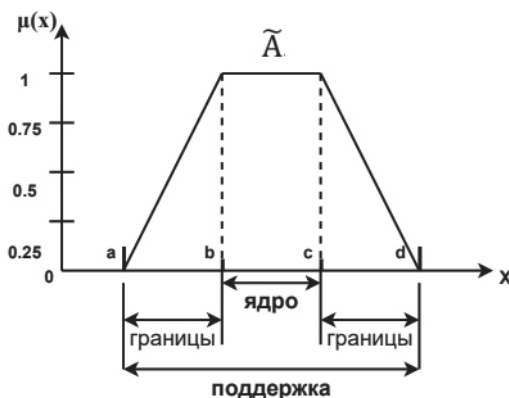


Рис. 2. Трапецевидная функция принадлежности.

Fig. 2. Trapezoidal membership function.

с принадлежностью. Любая данная запись из этой неоднозначной группы интерпретируется и рассчитывается оценка членства [27].

Представим простые и понятные математические уравнения, которые могут быть реализованы на любом языке программирования или в программном обеспечении ГИС, в следующем виде:

$$\bar{\mu}(x_i) = \begin{cases} 0, x_i < a_i \\ \frac{x_i - a_i}{b_i - c_i}, a_i \leq x_i \leq b_i, \\ 1, x_i > b_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\underline{\mu}(x_i) = \begin{cases} 1, x_i < d_i \\ \frac{d_i - x_i}{d_i - c_i}, d_i \leq x_i \leq c_i, \\ 0, x_i > c_i \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{\mu}$ — нечеткая функция линейного роста, $\underline{\mu}$ — линейная убывающая нечеткая функция, x_i — индекс оценки пространственной пригодности морской ветряной электростанции, a_i, d_i — нижний порог (контрольная точка) индекса нечеткого множества ветроэлектростанции x_i , b_i, c_i — точки, за пределами которых другие точки полностью подходят к нечеткому множеству.

После подготовки функций принадлежности в соответствии с требуемыми классами критериев, которые варьируются от нуля до единицы, наступает этап придания веса критериям. В настоящем исследовании для определения весов использован нечеткий метода анализа иерархии (НМАИ). Метод анализа иерархий (МАИ) разработан Томасом Саати [28] в 1980 году. МАИ помогает лицам, принимающим решения, глубже изучить детали как объективных, так и субъективных аспектов проблемы. МАИ состоит из трёх основных этапов:

- 1) организация сложных проблем в виде иерархии целей, альтернатив и критериев оценки альтернатив;
- 2) взаимно однозначное сравнение альтернатив на каждом шаге иерархии по каждому критерию на предыдущем уровне;
- 3) построение матрицы принятия решений по нескольким уровням иерархии.

Основная проблема использования МАИ — это неопределенность, предвзятость и расплывчатость мнений экспертов. Особенности рассуждений человека можно учесть с помощью теории нечетких множеств, разработанной Заде [29].

Метод НМАИ в отличие от обычного метода МАИ [30, 31] использует концепции теории нечетких множеств и анализа иерархической структуры для более адекватного решения сложной задачи принятия решений и представляет собой применение МАИ в нечеткой области с использованием нечетких чисел вместо действительных чисел [32]. НМАИ объединяет теорию нечетких чисел с базовым аналитическим иерархическим процессом для решения проблем принятия решений. В НМАИ критерии сравниваются друг с другом попарно через

лингвистические переменные, которые могут быть представлены в виде «троек» чисел [33], как показано в табл. 2.

Таблица 2

Определение масштаба НМАИ

Scale definition F_ANP

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)	

Для НМАИ предпринимаются следующие основные шаги:

Шаг 1. Каждый критерий или альтернатива сравнивается с остальными элементами с помощью лингвистических терминов, как показано в табл. 1, и соответствующие нечеткие треугольные числа присваиваются в соответствии с этими лингвистическими терминами:

$$\tilde{A} = \tilde{d}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & d_{12}^k & \cdots & d_{1n}^k \\ d_{21}^k & 1 & \cdots & d_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^k & d_{n2}^k & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Шаг 2. Среднее геометрическое FTN «z» [27] может быть оценено с помощью уравнения (4):

$$\tilde{z}_{ij} = \left[\prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

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

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \oplus \left[\sum_{j=1}^n \tilde{z}_{ij} \right]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) : l_{ij} \leq m_{ij} \leq u_{ij}; l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} \in [1, 9]. \quad (5)$$

Шаг 4. До сих пор все веса критериев по-прежнему будут нечеткие треугольные числа, поэтому их необходимо дефаззифицировать с помощью метода центра области, предложенного Чоу и Чангом [34]:

$$A_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}. \quad (6)$$

Шаг 5. Хотя на данном этапе A_i не является нечетким числом, все критерии должны быть нормализованы с помощью уравнения (7):

$$W_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \tag{7}$$

В настоящей статье вышеупомянутый пятиэтапный процесс использован для оценки нормализованных весов всех критериев. Чтобы прояснить методологию и увидеть возможности ее применения, рассмотрим реальный пример определения наиболее подходящего местоположения оффшорной ветровой электростанции на территории побережья Сирии.

Результаты исследования

Настоящее исследование проводилось с помощью программы ArcMap 10.6, основного компонента группы ArcGis от ESRI, которая используется для обработки, анализа и отображения геопространственных данных. Все слои данных, влияющих на размещение, установку и эксплуатацию МВЭ, были объединены на основе взвешенной линейной комбинации (ВЛК). Это позволило получить окончательную карту пригодности для морских ветровых электростанций.

Принятый подход позволил оценить все наборы данных, которые влияют на участки морских ветровых электростанций. Собранный набор данных состоит не только из ветровых ресурсов, но также включает социальные, экономические, экологические и технические параметры (туризм, глубина воды, толщина наносов, расстояние от электросети, удаленность от портов, удаленность от аэропортов, подводных кабелей, охраняемых территорий, судоходных путей, удаленность от туристических зон). Следует отметить, что в этом исследовании не оценивались два критерия: нефтяные платформы и связанные с ними трубопроводы, поскольку в особой экономической зоне Сирии нет нефтегазовых платформ и связанных с ними трубопроводов. Исходные данные для проведения настоящего исследования были собраны из источников, основанных на использовании данных дистанционного зондирования (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные и их источники
Data collection and sources

Критерий	Данные	Тип (Ф/О)	Источник
K1	Скорость ветра	Ф	Global Wind Atlas *
K2	Глубина воды	Ф	GEBCO_2022 Grid *
K3	Электрической сети	Ф	Каталог World Bank Data *
K4	Маршруты доставки	О	EMOD net Vessel Density *
K5	Толщина отложений	Ф	World Data Service for Geophysics [35]
K6	Порты	Ф	Данные Open Street Map *
K7	Туристические зоны	О	Данные Open Street Map *

Окончание табл. 3

Критерий	Данные	Тип (Ф/О)	Источник
K8	Охраняемые территории	Ф	Данные Open Street Map *
K9	Подводные телекоммуникационные кабели	О	Карта подводного кабеля *

* — электронный ресурс.

Второй шаг исследования включает преобразование факторов в нечеткие данные. Этот шаг выполняется для облегчения чтения данных, хранящихся в матричной форме, путем замены исходных значений нечеткими значениями. После применения нечеткой логики были сформированы слои, содержащие элементы со значениями от нуля до единицы (рис. 3). В следующей таблице представлены соотношения, которые используются для преобразования данных в категории нечетких множеств (табл. 4).

Таблица 4

Функции нечеткой принадлежности используемых критериев

Fuzzy membership functions of the criteria used

Критерий	Нечеткая функция	Критерий	Нечеткая функция
K1 (м/с)	$\bar{\mu}(x_i) = \begin{cases} 0, x < 4 \\ \frac{x-4}{4}, 4 \leq x \leq 8 \\ 1, x > 8 \end{cases}$	K2 (м)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 20 \\ \frac{500-x}{480}, 20 \leq x_i \leq 500 \\ 0, x > 500 \end{cases}$
K8 (км)	$\bar{\mu}(x) = \begin{cases} 0, x < 7 \\ \frac{x_i-7}{14}, 7 \leq x \leq 21 \\ 1, x > 21 \end{cases}$	K3 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 30 \\ \frac{50-x}{20}, 30 \leq x_i \leq 50 \\ 0, x > 50 \end{cases}$
		K5 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 2,5 \\ \frac{3-x}{0,5}, 2,5 \leq x_i \leq 3 \\ 0, x > 3 \end{cases}$
		K6 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 1,5 \\ \frac{25-x}{23,5}, 1,5 \leq x_i \leq 25 \\ 0, x > 25 \end{cases}$

Для ограничений был применен логический метод с целью преобразования значения внутри ячеек слоя в значения, принимающие одно из двух значений (0 — для значений, не удовлетворяющих условию, 1 — для значений, удовлетворяющего условию), как показано в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5

Определение ограничений и лимиты
Constraints definition and limitation

Ограничения	0	1
K4	Линии, как показано на рис. 5	другой
K7	Области, как показано на рис. 5	другой
K9	Линии, как показано на рис. 5	другой

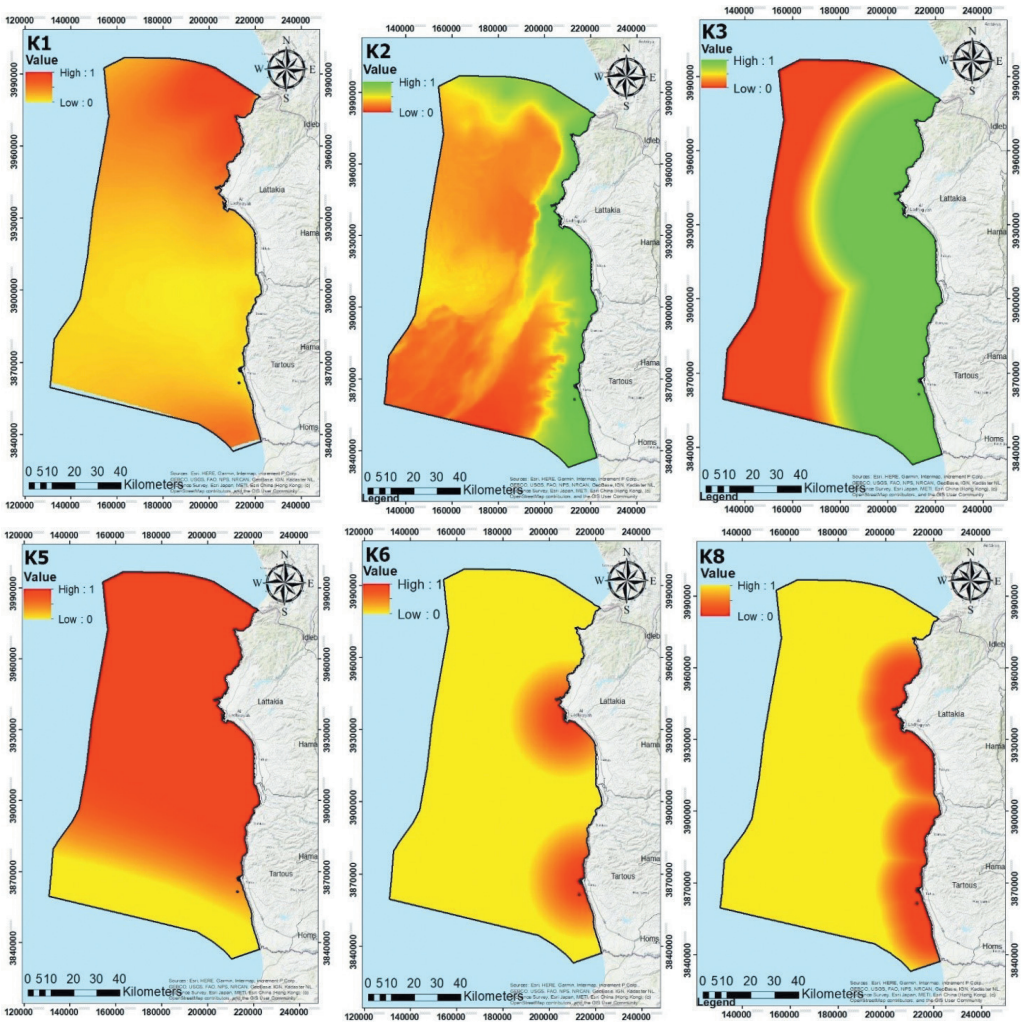


Рис. 3. Слои, полученные в результате применения нечетких функций принадлежности.

Fig. 3. Layers obtained as a result of applying fuzzy membership functions.

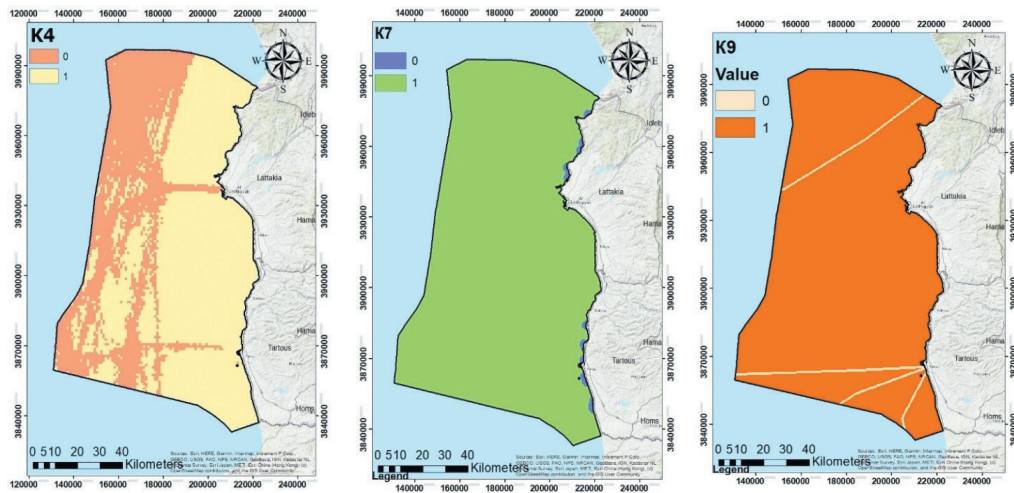


Рис. 4. Карты распределения пригодности оценочных показателей (0 — непригодные, 1 — наиболее подходящие места для развития оффшорной ветроэнергетики).

Fig. 4. Assessment indicator suitability distribution maps (0 — unsuitable, 1 — most suitable locations for offshore wind development).

В табл. 6 учитывается важность различных шкал, присвоенных «интенсивности важности» для определения влияния между парами. Например, коэффициенту плотности ветровой энергии был присвоен балл 3 по сравнению с 1/3, присвоенным коэффициенту глубины, так как последний составляет около 1/3 общей стоимости проекта и в соответствии с правилами попарного сравнения (см. табл. 2).

Таблица 6

Нечеткие сравнения по каждому критерию
Fuzzy comparisons for each criterion

	K1	K2	K3	K5	K6	K8
K1	1,1,1	2,3,4	4,5,6	5,6,7	6,7,8	9,9,9
K2	1/4,1/3,1/2	1,1,1	2,3,4	1,2,3	4,5,6	5,6,7
K3	1/6,1/5,1/4	1/4,1/3,1/2	1,1,1	4,5,6	5,6,7	6,7,8
K5	1/7,1/6,1/5	1/3,1/2,1	1/6,1/5,1/4	1,1,1	5,6,7	7,8,9
K6	1/8,1/7,1/6	1/6,1/5,1/4	1/7,1/6,1/5	1/7,1/6,1/5	1,1,1	4,5,6
K8	1/9,1/9,1/9	1/7,1/6,1/5	1/8,1/7,1/6	1/9,1/8,1/7	1/6,1/5,1/4	1,1,1

На последнем этапе нечеткие веса преобразуются в относительные нечеткие веса (A_i) путем получения среднего значения нечетких чисел (l , m и u) для каждого критерия. Затем, используя нечеткие веса, т.е. значения A_i , вычисляется нормализованный вес W_i каждого критерия (табл. 7).

Таблица 7

Окончательный относительный вес для каждого критерия

Final relative weight for each criterion

Шсi	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>Ai</i>	<i>Wi</i>
C1	0,3223	0,5564	0,6221	0,4671	0,4468
C2	0,1345	0,2215	0,3262	0,2237	0,2142
C3	0,1287	0,2414	0,2423	0,1756	0,1681
C4	0,0732	0,1124	0,1572	0,1112	0,1065
C5	0,0363	0,0435	0,0642	0,0427	0,0428
C6	0,0254	0,0224	0,0291	0,0284	0,0215

Используя тематические слои критериев и команды программного обеспечения, ГИС (евклидово расстояние, уклон, пространственный анализ, пересечение, стирание и буферы), были получены глобальные тематические растровые слои карты пригодности береговой ветровой электростанции. Карты пригодности были подготовлены, в которых каждое местоположение было масштабировано от 0 до 1; где 0 — наименее подходящие участки, а 1 — наиболее подходящие участки для развития морских ветряных электростанций.

Большинство подходящих мест находится на северо-востоке сирийских территориальных вод (рис. 5), что обусловлено большой скоростью ветра, малой

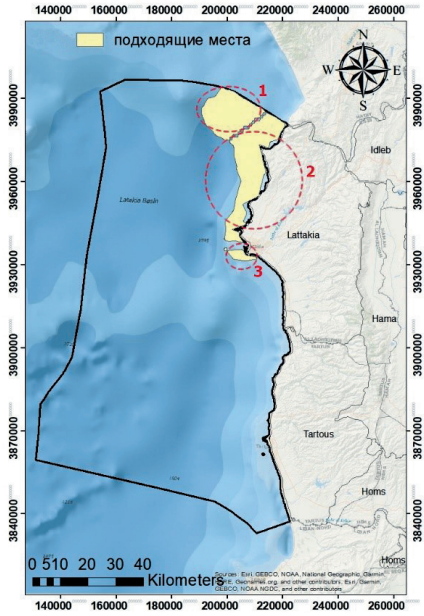


Рис. 5. Окончательная карта пригодности для морской ветроэнергетики в Сирии.

Fig. 5. Final suitability map for offshore wind power in Syria.

глубиной воды и малой мощностью морских отложений. Эти территории обведены на рис. 5 красным цветом. Теоретический ветровой потенциал можно рассчитать с помощью уравнения (8), используя генерирующую мощность ветровой турбины, диаметр ротора и площадь общего количества пикселей для наиболее подходящих областей (табл. 8) [41]:

$$S = R_d^2 \times L_d \times L_c, \quad (8)$$

где S — расстояние между массивами морских ветровых турбин, R_d — диаметр ротора, L_d — фактор расстояния по ветру, L_c — фактор расстояния при боковом ветре.

Таблица 8

Теоретический потенциал ветровой энергии
Theoretical potential of wind energy

	Модель ветряной турбины	Диаметр ротора, м	Мощность, МВт	Площадь, км ²	Количество турбин	Расчетная мощность, МВт
Красный круг 1	WD2,5—103	103	2,5	252,60	476	1190,49
Красный круг 2				388,92	733	1832,96
Красный круг 3				25,46	48	120,009
Всего				666,98	1257	3,14 ГВт

Для уменьшения турбулентных помех между турбинами оптимальное расстояние между ними должно быть в 5—10 раз больше диаметра ротора. Типичный диаметр турбины мощностью 2,5 МВт составляет 103 метра, а технические характеристики турбины соответствуют отчету сирийского производителя ветровых турбин. Таким образом, коэффициент расхождения равен 0,53 квадратных километров. Один квадратный километр морской воды может содержать примерно 5,3 мегаватта установленной мощности. Мощность подходящих регионов оценивается примерно в 3,14 ГВт.

Заключение

В статье решена задача определения наиболее подходящих мест для размещения морских ветровых турбин в сирийских территориальных водах. В исследовании учитывались имеющиеся ветровые ресурсы, существующие виды использования морского пространства и экологические ограничения, а также эксплуатационные потребности ветровой электростанции.

Показано важное значение для экологической устойчивости и экономической жизнеспособности проектов ветровых установок с учетом возможностей разрешения конфликтов между пользователями морского пространства на этапе планирования. Это позволило рационально использовать прибрежное пространство. Была подчеркнута полезность результатов настоящего исследования на основе ГИС для задачи планирования устойчивого морского ветра. Метод представляет собой простой вспомогательный инструмент для лиц, принимающих решения. Заинтересованные стороны могут расставить приоритеты в своей деятельности

с учетом конкретных технических, экологических и социальных, экономических ограничений. Кроме того, метод позволяет достаточно быстро реализовать новые сценарии.

Будущие рекомендации по совершенствованию этого инструмента и процесса принятия решений включают добавление дополнительных модулей для динамического включения и исключения альтернативных решений, различных подходов и агрегирования индивидуальных оценок для получения группового решения. Внедрение НМАИ может помочь в ранжировании местоположений, и упростить систему с точки зрения ее удобства для пользователя и способствовать более широкому участию в процессе принятия решений.

Список литературы

1. Noori M., Kucukvar M., Tatari O. Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems // *International Journal of Green Energy*. 2015. Vol. 12. P. 939—948. doi: 10.1080/15435075.2014.890103.
2. Waewsak J., Landry M., Gagnon Y. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 81. P. 609—626. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.069.
3. Argin M., Volkan Y. Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey // *International Journal of Green Energy*. 2017. Vol. 14. P. 811—818. doi: 10.1080/15435075.2017.1331443.
4. Sun X., Huang D. An explosive growth of wind power in China // *International Journal of Green Energy*. 2014. Vol. 11. P. 849—860. doi: 10.1080/15435075.2013.830261.
5. Christoforaki M., Tsoutsos T. Sustainable siting of an offshore wind park a case in Chania, Crete // *Renew Energy*. 2017. Vol. 109. P. 624—633. doi: 10.1016/j.renene.2017.03.063.
6. Keivanpour S., Ramudhin A., Kadi D. The sustainable worldwide offshore wind energy potential: a systematic review // *Renew Sustain Energy*. 2017. Vol. 6. P. 1—18. doi: 10.1063/1.5009948.
7. Cameron L. R., Veum K. C., Hekkenberg M., et al. Delivering offshore electricity to the EU: spatial planning of offshore renewable energies and electricity grid infrastructures in an integrated EU maritime policy. *European Wind Energy Association*. 2012. 42 p.
8. Künneke R., Mehos D. C., Hillerbrand R., Hemmes K. Understanding values embedded in offshore wind energy systems: toward a purposeful institutional and technological design // *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 53. P. 118—129. doi: 10.1016/j.envsci.2015.06.013.
9. Díaz H., Fonseca R. B., Guedes S. C. Site selection process for floating offshore wind farms in Madeira Islands // *Advances in renewable energies offshore*. 2019. № 134. P. 729—737.
10. Baban M. J., Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK // *Renewable energy*. 2001. Vol. 24. P. 59—71. doi: 10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
11. Istomin E. P., Burlov V. G., Abramov V. M., Sokolov A. G. et al. decision support model within environmental economics // *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2019. P. 139—146.
12. Kim T., Park J. Il., Maeng J. Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea // *Renewable energy*. 2016. Vol. 94. P. 619—628. doi: 10.1016/j.renene.2016.03.083.
13. James R., Costa Ros M. Floating offshore wind: market and technology review // *The Carbon Trust*. United Kingdom. 2015. 66 P.
14. Burlov V. G. The methodological basis for solving the problems of information warfare and security protection // *Proceedings of the 13th International Conference on Cyber Warfare and Security*. 2018. P. 64—74.
15. Abramov V. M., Burlov V. G., Istomin E. P., et al. geo-information and geo-ecological support tools development for environmental economics / *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA*. 2019. P. 7053—7061.
16. Burlov V. G. The Methodological Basis for the Management of social media / *Proceedings of the 5th European Conference on social media, ECSM 2018*. 2018. P. 22—30.

17. Солиман Х., Бурлов В. Г., Украинцева Д. А. Использование нечеткой логики в среде ГИС для выбора местоположения ветряных электростанций, на примере провинции Хомс, Сирия // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 11(125). С. 82. doi: 10.23670/IRJ.2022.125.17.
18. Holland G. B., Provenzano J. J. The hydrogen age: empowering a clean-energy future // Gibbs Smith. Layton, Utah. 2007. 76 p.
19. Gorayeb A., Brannstrom C., de Andrade M., de Sousa M. J. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil // *Energy research & social science*. 2018. Vol. 94. P. 82—88. doi: 10.1016/j.erss.2017.11.027.
20. Vasileiou M., Eva L., Dimitra G. V. GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017. V. 73. P. 745—757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161.
21. Chaouachi A., Catalin F. C., Mircea A. Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States // *Energy Policy*. 2017. V.103. P. 179—192. doi: 10.1016/j.enpol.2017.01.018.
22. Byrnes M. Assessing potential environmental impacts of offshore sand and gravel mining // *Final Report to the Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Coastal Zone Management*. 2000. 15 p.
23. Taoufik M., Ahmed F. GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 11. P. 100103. doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100103.
24. Huang J., Huang X., Song N., et al. Evaluation of the Spatial Suitability of Offshore Wind Farm—A Case Study of the Sea Area of Liaoning Province // *Sustainability*. 2022. №14(1). P. 449. doi: 10.3390/su14010449.
25. Cavazzi S., Dutton A. G. An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 87. P. 212—228. doi: 10.1016/j.renene.2015.09.021.
26. Eastman J., Ronald H. J., James T. Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS // *Multicriteria analysis for land-use management*. Springer, Dordrecht. 1998. Vol. 9. P. 227—251. doi: 10.1007/978-94-015-9058-7_13.
27. Buckley J. J. Fuzzy Hierarchical Analysis // *Fuzzy Sets and Systems*. 1985. Vol. 17. P. 233—247.
28. Saaty, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process // *Interfaces*. 1994. № 24(6). P. 19—43. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
29. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 3—28. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
30. Ruoning X., Xiaoyan Z. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment // *Fuzzy Sets Syst*. 1992. № 52 (3). P. 251—257. doi: 10.1016/0165-0114(92)90236-W.
31. Cheng C. H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function // *European journal of operational research*. 1997. № 96(2). P. 343—350. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00026-4.
32. Petkovic J., Sevarac Z., Jaksic M. L., Marinkovic S. Application of fuzzy AHP method for choosing a technology within service company // *Technics technologies education management-TTEM*. 2012. № 7(1). P. 332—341.
33. Kilinci O., Onal S A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company // *Expert system with Applications*. 2011. № 38(8). P. 9656—9664. doi: 10.1016/j.eswa.2011.01.159.
34. Chou S. W., Chang Y. C. The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits // *Decision support systems*. 2008. № 46(1). P. 149—157. doi: 10.1016/j.dss.2008.06.003.
35. Straume E.O., Gaina C., Medvedev S., et al. Updated total sediment thickness in the world's oceans. *Geochem Geophys* 2019; 20(4). P. 56—72. doi: 10.1029/2018GC008115.

References

1. Noori M., Kucukvar M., Tatari O. Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems. *International Journal of Green Energy*. 2015;(12):939—948. doi: 10.1080/15435075.2014.890103.
2. Waewsak J., Landry M., Gagnon Y. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy*. 2015;(81):609—626. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.069.

3. Argin M., Volkan Y. Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey. *International Journal of Green Energy*. 2017;(14):811—818. doi: 10.1080/15435075.2017.1331443.
4. Sun X., Huang D. An explosive growth of wind power in China. *International Journal of Green Energy*. 2014;(11):849—860. doi: 10.1080/15435075.2013.830261.
5. Christoforaki M., Tsoutsos T. Sustainable siting of an offshore wind park a case in Chania, Crete. *Renew Energy*. 2017;(109): 624—633. doi: 10.1016/j.renene.2017.03.063.
6. Keivanpour S., Ramudhin A., Kadi D. The sustainable worldwide offshore wind energy potential: a systematic review. *Renew Sustain Energy*. 2017;(6):1—18. doi: 10.1063/1.5009948.
7. Cameron L. R., Veum K. C., Hekkenberg M., et al. Delivering offshore electricity to the EU: spatial planning of offshore renewable energies and electricity grid infrastructures in an integrated EU maritime policy. European Wind Energy Association. 2012: 42 p.
8. Künneke R., Mehos D. C., Hillerbrand R., Hemmes K. Understanding values embedded in offshore wind energy systems: toward a purposeful institutional and technological design. *Environmental Science & Policy*. 2015; (53):118—129. doi: 10.1016/j.envsci.2015.06.013.
9. Díaz H., Fonseca R. B., Guedes S. C. Site selection process for floating offshore wind farms in Madeira Islands. *Advances in renewable energies offshore*, 2019;(134): 729—737.
10. Baban M. J., Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*. 2001;(24):59—71. doi: 10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
11. Istomin E. P., Burlov V. G., Abramov V. M., Sokolov A. G. et al. Decision support model within environmental economics. *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2019: 139—146.
12. Kim T., Park J. Il., Maeng J. Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea. *Renewable energy*. 2016;(94):619—628. doi: 10.1016/j.renene.2016.03.083.
13. James R., Costa Ros M. Floating offshore wind: market and technology review. *The Carbon Trust. United Kingdom*. 2015: 66 p.
14. Burlov V. G. The methodological basis for solving the problems of information warfare and security protection. *Proceedings of the 13th International Conference on Cyber Warfare and Security*. 2018: 64—74.
15. Abramov V. M., Burlov V. G., Istomin E. P., et al. Geo-information and geo-ecological support tools development for environmental economics. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA*, 2019:7053—7061.
16. Burlov V. G. The Methodological Basis for the Management of social media. *Proceedings of the 5th European Conference on social media, ECSM*. 2018. 2018: 22—30.
17. Soliman H., Burlov V. G., Ukraintseva D. A. Using fuzzy logic in a GIS environment to select the location of wind farms, in the territory of the province of Homs, Syria. *International research journal*. 2022;11(125):82. doi: 10.23670/IRJ.2022.125.17. (In Russ.).
18. Holland G. B., Provenzano J. J. *The hydrogen age: empowering a clean-energy future*. Gibbs Smith. Layton, Utah. 2007: 76 p.
19. Gorayeb A., Brannstrom C., de Andrade M., de Sousa M. J. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. *Energy research & social science*. 2018;(94):82—88. doi: 10.1016/j.erss.2017.11.027.
20. Vasileiou M., Eva L., Dimitra G. V. GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017;(73):745—757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161.
21. Chaouachi A., Catalin F. C., Mircea A. Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*. 2017;(103):179—192. doi: 10.1016/j.enpol.2017.01.018.
22. Byrnes M. Assessing potential environmental impacts of offshore sand and gravel mining. *Final Report to the Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Coastal Zone Management*. 2000: 15 p.
23. Taoufik M., Ahmed F. GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco. *Energy Conversion and Management*. 2021;(11):100103. doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100103.
24. Huang J., Huang X., Song N., et al. Evaluation of the Spatial Suitability of Offshore Wind Farm—A Case Study of the Sea Area of Liaoning Province. *Sustainability*. 2022;14(1):449. doi: 10.3390/su14010449.
25. Cavazzi S., Dutton A. G. *An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential*. 2016: 212—228. doi: 10.1016/j.renene.2015.09.021.

26. Eastman J., Ronald H. J., James T. Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. *Multicriteria analysis for land-use management*. Springer. Dordrecht. 1998;(9):227—251. doi: 10.1007/978-94-015-9058-7_13.
27. Buckley J. J. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 1985:233—247.
28. Saaty, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*. 1994:19—43. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
29. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Information and Control*. 1965;(8):3—28. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
30. Ruoning X., Xiaoyan Z. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment. *Fuzzy Sets Syst*. 1992;52 (3):251—257. doi: 10.1016/0165-0114(92)90236-W.
31. Cheng C. H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function. *European journal of operational research*. 1997;96(2):343—350. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00026-4.
32. Petkovic J., Sevarac Z., Jaksic M. L., Marinkovic S. Application of fuzzy AHP method for choosing a technology within service company. *Technics technologies education management-TTEM*. 2012;7(1): 332—341.
33. Kilincci O., Onal S A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Expert system with Applications*. 2011;38(8):9656—9664. doi: 10.1016/j.eswa.2011.01.159.
34. Chou S. W., Chang Y. C. The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits. *Decision support systems*. 2008;46(1):149—157. doi: 10.1016/j.dss.2008.06.003.
35. Straume E.O., Gaina C., Medvedev S., et al. Updated total sediment thickness in the world's oceans. *Geochem Geophys* 2019;20(4):56—72. doi: 10.1029/2018GC008115.

Информация об авторах

Вячеслав Георгиевич Бурлов, доктор технических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, burlovvg@mail.ru.

Хасан Солиман, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, hassansoliman2233@gmail.com.

Дарья Андреевна Карпенкова (Украинцева), студент, Российский государственный гидрометеорологический университет, ukrainceva2000@yandex.ru.

Анастасия Алексеевна Домостроева, аспирант Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, adomostroeva@mail.ru.

Information about authors

Vyacheslav Georgievich Burlov, Grand PhD (Tech. Sci), Professor, Russian State Hydrometeorological University, burlovvg@mail.ru.

Hasan Soliman, student PhD, Russian State Hydrometeorological University, hassansoliman2233@gmail.com.

Daria Andreevna Karpenkova (Ukrainceva), Student, Russian State Hydrometeorological University, ukrainceva2000@yandex.ru.

Anastasiia Alekseevna Domostroeveva, post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, adomostroeva@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.03.2023

Принята к печати после доработки 09.08.2023

The article was received on 22.03.2023

The article was accepted after revision on 09.08.2023