

М. Ю. Демидионов**ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ
ПРИМОРСКОГО КРАЯ К РАЗВИТИЮ
ШЕЛЬФОВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 30.03.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-5

70

Для цитирования: Демидионов М. Ю. Оценка пригодности прибрежной зоны Приморского края к развитию шельфовой ветроэнергетики // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2025. №3. С. 70—84. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-5.

Рассматривается вопрос выявления наиболее пригодных территорий прибрежья Приморского края для установки шельфовых ветроэлектростанций, в том числе с возможностью использования полученной электроэнергии для производства «зеленого» водорода. В качестве метода оценки был выбран метод анализа иерархий в комбинации с нечеткой логикой, применяемой для унификации абсолютных значений параметров. Для анализа отобрано 11 критериев, оказывающих влияние на пригодность территории к установке ВЭС. Опрошено 6 экспертов в соответствующей области для расчета весов критериев и произведена унификация абсолютных значений. После получения индекса пригодности из анализа исключены территории, где размещение ВЭС технически нежелательно. В результате наибольшие значения индекса выявлены в Уссурийском заливе, в прибрежной зоне возле портов Восточный и Находка, а также неподалеку от порта Ольга. Развитие ветроэнергетики может стать важным подспорьем в развитии региона как с технологической точки зрения, так и при решении проблем энергодефицита, а производство «зеленого» водорода позволит создать в регионе крупный хаб по торговле водородом между странами Азиатско-Тихоокеанского региона. Все вышеупомянутые пункты отвечают потребностям страны, что выражено в концепции развития водородной энергетики РФ и доктрине энергетической безопасности РФ.

Ключевые слова: шельфовые ВЭС, Азиатско-Тихоокеанский регион, метод анализа иерархий, пространственный анализ, «зеленый» водород, энергетическая безопасность

Введение

С начала XXI в. доля возобновляемой энергетики в энергобалансе ряда мировых стран неуклонно растет. Данная тенденция характерна и для некоторых стран, входящих в состав БРИКС [1]. В Российской Федерации использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) постепенно получает свое развитие, хотя отставание в этой сфере от ряда стран, к примеру от Китая и США, очевидно. Данное явление носит комплексный характер и обусловлено рядом факторов, таких как



поздний старт развития соответствующих сфер энергетики и большие запасы углеводородов, благодаря которым не возникает проблемы в обеспечении энергией собственного населения и решается вопрос экспорта [2]. Однако, как было ранее отмечено, в России наблюдается развитие сфер энергетики, связанных с ВИЭ, чем обусловлена актуальность и своевременность исследований по данной тематике. Промышленное развитие рассматриваемой сферы выражается в реализации таких амбициозных проектов, как Кольская ВЭС, являющаяся крупнейшей ВЭС за полярным кругом.

При развитии соответствующих направлений энергетики в региональном масштабе особую роль приобретают географические исследования, так как по своей сути они обладают необходимой комплексностью, которая позволяет всестороннее оценить различные аспекты затрагиваемого вопроса. В связи с тем что возобновляемая энергетика, как никакая другая, связана с географическими процессами и имеет строгую локализацию согласно мере воздействия различных природных сил (скорость ветра, приход солнечной радиации и пр.), при проведении исследований, направленных на оценку пригодности и потенциала территории к использованию ВИЭ, именно географическая наука приобретает экзистенциальный характер, что отчасти отражает концепцию географического неопределенности. Данное утверждение подкрепляется многочисленными исследованиями, затрагивающими вопросы возобновляемой энергетики и опирающимися на географический базис.

Одним из важных направлений в подобных исследованиях является использование группы методов мультикритериального анализа при определении оптимальных локаций для размещения объектов энергетики. При использовании методов, входящих в указанную группу, оценка производится на основе данных различных критериев (физико-географических и экономико-географических), складывающихся в целостную картину для каждой отдельной территории. В РФ подобные исследования проводились для ряда регионов. Одним из наиболее заметных среди них стала кандидатская диссертация Т.Ю. Горбуновой по оценке потенциала использования ВИЭ на юго-восточных территориях Республики Крым [3]. Помимо оценки собственно потенциала, в данной работе отдельное внимание уделено геоэкологическим последствиям, в частности сокращению выбросов CO₂. Также можно выделить исследование по оценке потенциала развития ветровой и солнечной энергетики острова Сахалин [4]. Некоторые аспекты солнечной энергетики Мурманской области рассматривались в работе Н.И. Лазарева и Н.М. Кузнецова [5]. Кроме того, стоит отметить масштабную деятельность НИЛ возобновляемых источников энергии МГУ [6].

Отдельной темой является поиск оптимальных локаций для размещения объектов генерации электроэнергии с использованием ВИЭ на шельфовых ветроэлектростанциях (ВЭС). Данный вопрос подробно изучается в зарубежной литературе. Среди подобных исследований отметим работы по оценке прибрежных территорий Мексики [7], Турции [8; 16], Марокко [12], Северной Ирландии [13], Южной Африки



[14], Греции [15], Балтийского моря [9], залива Мэн [10]. Выделяется работа Х. Диаса и др. [11], в которой представлен сравнительный анализ различных методов из группы мультикритериального анализа. Исследование производилось на основе данных прибрежных территорий Шотландии и острова Мадейра.

Некоторые из вышеупомянутых исследований направлены не только на оценку собственно шельфовой ветроэнергетики, но и на рассмотрение ее в соединении с возможностью производства «зеленого» водорода, то есть водорода, получаемого методом электролиза с использованием электроэнергии, источником которой являются ВИЭ. Актуальность рассмотрения данного вопроса в совокупности с вопросом использования шельфовых ВЭС заключается в возможности создания единой системы, включая портовую инфраструктуру для последующего экспорта водорода. В свою очередь, морской метод доставки водорода представляется наиболее выгодным, когда речь идет о больших расстояниях [17]. Кроме того, шельфовая зона отличается более стабильными и высокими скоростями ветра, что критически важно для функционирования ВЭС.

В отечественной литературе исследования, посвященные поиску оптимальных локаций для размещения шельфовых ВЭС, встречаются крайне редко, хотя это направление является крайне перспективным. Данный тезис подтверждается наличием Концепции развития водородной энергетики РФ [18], в которой обосновывается необходимость создания в РФ как минимум трех кластеров по производству «зеленого» водорода, в том числе «Восточного». Учитывая приморское положение Дальнего Востока, а также постепенную переориентацию экспорта России на Азиатско-Тихоокеанский рынок, можно предположить, что именно это направление будет наиболее перспективным для соответствующих изысканий.

Представленное исследование направлено на поиск оптимальных локаций для расположения шельфовых ВЭС с возможной ориентацией на производство «зеленого» водорода в прибрежной зоне Приморского края.

Материалы и методы

Основным методом для расчета степени пригодности территории к развитию шельфовой ветроэнергетики стал Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [19] и широко используемый в подобных исследованиях. Суть метода заключается в расчете коэффициента пригодности территории на основе матриц попарного сравнения, составленных экспертами в своей области. В матрицах представлены критерии, оказывающие влияние на расположение соответствующих типов электростанций. Данные критерии представлены как физико-географическими факторами (к примеру, скорость ветра), так и экономико-географическими (инфраструктурными). Эксперты заполняют матрицы в зависимости от того, насколько важно учитывать тот или иной



критерий при размещении электростанции. Оценка производится на основе девятибалльной шкалы сравнения (табл. 1), разработанной Т. Саати [19].

Таблица 1

Шкала сравнения по Т. Саати

Описание значимости	Значения	Инверсивные значения
Одинаковая значимость	1	1
Умеренное превосходство	3	1/3
Сильное превосходство	5	1/5
Очень сильное превосходство	7	1/7
Абсолютное превосходство	9	1/9
Промежуточные значения	2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

73

После получения матриц от экспертов производится их усреднение. Существует дискуссия по поводу того, какой метод для усреднения значений матрицы более эффективен. В данном исследовании было принято решение использовать среднее геометрическое, так как оно позволяет сохранить в действии правило согласованности матрицы, что положительно повлияет на итоговую точность результата [20]. На основе полученной матрицы рассчитываются веса критериев.

На следующем этапе необходимо произвести проверку матрицы на согласованность, чтобы исключить любые чрезмерные расхождения в мнениях экспертов. Для проведения данной операции необходимо получить коэффициент согласованности матрицы (CR). Его значение не должно превышать 0,1, в противном случае необходимо пересмотреть составленные экспертами матрицы. Расчет коэффициента происходит следующим образом:

$$CR = \frac{\left(\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right)}{RI}, \quad (1)$$

где n — размерность матрицы, $\lambda_{\max}$ — наибольшее собственное значение матрицы, RI — среднее значение индекса однородности в зависимости от размерности матрицы (табл. 2).

Таблица 2

Индекс однородности матрицы попарного сравнения в зависимости от размерности матрицы

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,52	0,89	1,12	1,26	1,36	1,41	1,46	1,49	1,52

После получение весов критериев в ряде подобных исследований производится унификация их абсолютных значений. Стандартизация



необходима в связи с тем, что у ряда критериев разнятся единицы измерения, а также из-за того, что влияние некоторых критериев на результат изменяется нелинейно. В текущем исследовании для решения данной задачи была использована нечеткая логика. Суть метода заключается в расчете степени принадлежности значения к множеству. Данное значение находится в промежутке между 0 и 1. Таким образом, все параметры выбранных критериев приходят к единому знаменателю, что позволяет производить дальнейшие вычисления [21]. При подобном подходе дискуссионным является вопрос о том, какими функциями для унификации, подходящими под понятие нечеткой логики, следует воспользоваться при произведении расчетов для различных критериев.

Для настоящего исследования было принято решение использовать три функции, представленные в таблице 3.

Таблица 3

**Функции, входящие в инструментарий нечеткой логики,
использованные в исследовании**

Функция	Уравнение
Сигмоидальная	$\mu(x) = \begin{pmatrix} 0 & x \leq a \\ \cos^2 \alpha e \alpha = \left(1 - \frac{x-a}{b-a}\right) & a < x < b \\ 1 & x \geq b \end{pmatrix}$
Линейная возрастающая	$\mu(x) = \begin{pmatrix} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 1 & x \geq b \end{pmatrix}$
Линейная убывающая (II)	$\mu(x) = \begin{pmatrix} 0 & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{pmatrix}$

Были выбраны 11 критериев, которые могут оказывать влияние на размещение шельфовых ВЭС. Стоит отметить, что большинство критериев из данного набора достаточно типично и представлено в большинстве схожих исследований. В качестве примера можно привести скорость ветра — ключевой параметр, определяющий эффективность ВЭС (как обычной, так и шельфовой). В свою очередь, такие критерии (характерные только для исследований, рассматривающих шельфовые ВЭС), как высота волны, встречаются реже, однако их тоже следует принимать во внимание. Вместе с тем чрезмерное количество критериев может повлечь за собой проблемы с согласованностью матрицы из-за слишком большой выборки, поэтому их количество обычно не превышает 15. Критерии, а также параметры унификации, использованные в текущем исследовании, представлены в таблице 4.



Таблица 4

Критерии и параметры унификации

Критерий	Функция унификации	Единицы измерения	Параметр унификации	
			a	b
Скорость ветра	Сигмоидальная	м/с	4	13
Глубина	Линейная убывающая (II)	м	10	80
Пути морского транспорта	Линейная убывающая (II)	Количество сигналов AIS	мин.	макс.
Толщина осадочного слоя	Линейная убывающая (II)	м	мин.	макс.
Расстояние от портов	Линейная убывающая (II)	м	10000	100000
Расстояние от берега	Линейная убывающая (II)	м	10000	100000
Высота волны	Линейная убывающая (II)	м	мин.	макс.
Расстояние от ООПТ	Линейная возрастающая	м	2000	20000
Подводные кабели	Линейная возрастающая	м	500	10000
Расстояние от ЛЭП	Линейная убывающая (II)	м	мин.	120000
Расстояние от аэропортов	Линейная возрастающая	м	15000	макс.

75

Основополагающим критерием для поиска локации для расположения ВЭС является *скорость ветра*. В ряде исследований вместо данного показателя используется плотность энергии ветра — понятие, в которое помимо скорости ветра входит и плотность атмосферы, зависящая от рельефа. Учитывая, что текущие расчеты производятся относительно морских территорий, необходимость принимать во внимание особенности рельефа отпадает, таким образом, можно ограничиться только скоростью ветра. Важно отметить, что для унификации упомянутого критерия используется сигмоидальная функция, а не линейная возрастающая. Данный выбор обусловлен тем, что на практике зависимость скорости ветра и фактической выработки электроэнергии выражается именно сигмоидальной функцией [22]. Параметры унификации введены согласно стандартным техническим характеристикам средней ВЭС, предназначенной для работы на шельфе: SG 6.0-155 [16]. Скорость ветра анализируется для высоты в 100 метров над уровнем моря.

Глубина напрямую влияет на стоимость строительства ВЭС. В данном исследовании в центре внимания находится сценарий с установкой ВЭС на фундаменте, вследствие чего рассматриваются только глубины до 80 метров [23], хотя существуют и плавающие ВЭС, позволяющие оперировать на больших глубинах. Для унификации была использована линейная убывающая функция, так как меньшая глубина установки ВЭС положительно влияет на снижение стоимости как строительства, так и последующего обслуживания станции. Другим значимым физико-географическим критерием является *высота волны*. Его влияние на расположение ВЭС выражается в повышении стоимости



обслуживания и строительства при большей высоте волны, а также усилении вибраций на фундамент, что негативно сказывается на долговечности конструкции. Зачастую в подобных исследованиях используется такой показатель, как «значительная высота волн» (significant wave height), который определяется как средняя высота волны (от подошвы до гребня) самой высокой трети волн [9; 10]. Таким образом, большинство волн в точке пространства будут равны или ниже самого значения, что позволяет говорить о преобладающей высоте волн. Отдельно стоит отметить критерий *толщина осадочного слоя*. Согласно исследованию М. Тауфик и А. Фекри [12], большая толщина данного слоя повышает стоимость строительства станции, так как вызывает необходимость использовать большее количество материала.

Экономико-географические критерии можно разделить на две условные группы: 1) близкое расположение ВЭС с которыми является преимуществом; 2) в случае которых подобное соседство сказывается негативно. В случае с первыми для унификации использовалась линейная убывающая функция. В число подобных критериев входят *расстояние от портов, расстояние от берега и расстояние от ЛЭП*. Данную группу объединяет тот факт, что близкое расположение к подобной инфраструктуре упрощает логистику и, как следствие, удешевляет производство. Отдельно стоит отметить вопрос о расстоянии до портов. Этот фактор включен в исследование не только с позиции логистики обслуживания ВЭС, но и с идеей потенциального экспорта «зеленого» водорода морским путем. В то же время как от берега, так и от портов должно выдерживаться определенное расстояние, чтобы не создавать проблем для судоходства. В большинстве исследований данное расстояние составляет 10 км. С целью соблюдения интересов судоходства введен и критерий *пути морского транспорта*. Зачастую в подобных исследованиях используется критерий расстояний от путей следования морского транспорта [16; 24]. При подобном подходе вычленяются основные маршруты следования кораблей (линейные) и производится соответствующий расчет буферной зоны. В таком случае при унификации используют различные типы возрастающей функции. Однако для текущего исследования было принято решение отталкиваться от данных о количестве зарегистрированных сигналов AIS в каждой точке, что позволяет более детально выделить зоны не только с активным судоходством, но и с менее интенсивным. Так как в качестве параметра «а» при унификации данного критерия было выбрано минимальное значение сигналов, а для «b» — максимальное, то в качестве функции также служит линейная убывающая функция.

Использование линейной возрастающей функции обусловлено теми случаями, когда расположение ВЭС рядом с объектом нежелательно. Под подобные критерии подпадают *расстояния от ООПТ, аэропортов (и взлетно-посадочных полос), а также от подводных кабелей*. В случае с аэропортами важным вопросом является то, какую буферную зону необходимо выдерживать от подобной инфраструктуры, так как работа ВЭС создает излишнюю турбулентность. В боль-



шинстве исследований данный показатель варьируется от 3 до 15 километров [12; 14; 25; 26]. В текущем исследовании в целях обеспечения безопасности было принято решение использовать значение в 15 километров.

После расчета весов критериев и унификации их абсолютных значений можно получить индекс пригодности территории к размещению шельфовых ВЭС. Для этого используется взвешенная линейная комбинация:

$$A^{WLC-score} = \sum_{i=1}^n x_i w_i, \quad (2)$$

77

где $A^{WLC-score}$ — индекс пригодности (0 — наименее пригодные территории, 1 — наиболее пригодные), x_i — унифицированное значение параметров, w_i — вес критерия.

Дополнительно необходимо исключить из полученных данных те территории, где соответствующая хозяйственная деятельность невозможна. Параметры, согласно которым производилось исключение, а также источники данных представлены в таблице 5. В результате удалось получить итоговый массив данных, в котором присутствуют как исключенные из анализа территории, так и обладающие различным индексом пригодности. Полученный массив был разделен на классы согласно методике, предложенной в исследовании М. Баржекара, однако их количество изменено на 4. Классы «очень низкий» и «низкий» объединены в один ввиду меньших перспектив развития отрасли на территориях, имеющих подобные индексы пригодности.

Таблица 5

Параметры, согласно которым происходило исключение ряда территорий, а также источники данных

Критерий	Исключенные территории	Источник данных
Скорость ветра	—	Global Wind Atlas
Глубина	> 80 м	Open Topography
Пути морского транспорта	> 100 000 сигналов AIS	World Bank Group
Толщина осадочного слоя	—	GlobeSed
Расстояние от портов	< 10 000 м	NextGIS
Расстояние от берега	< 10 000 м	NextGIS
Высота волны	—	Copernicus
Расстояние от ООПТ	< 2 000 м	NextGIS
Подводные кабели	< 500 м	TeleGeography
Расстояние от ЛЭП	—	NextGIS
Расстояние от аэропортов	< 15 000 м	NextGIS



Результаты и обсуждение

Для составления матриц попарного сравнения были опрошены 6 экспертов в области анализа ветроэнергетического потенциала и/или занимающиеся вопросам географических исследований в возобновляемой энергетике. На основе матриц были рассчитаны веса критериев, представленные на рисунке 1. Стоит отметить, что CR составил 0,031, что говорит о высокой степени согласованности матрицы.

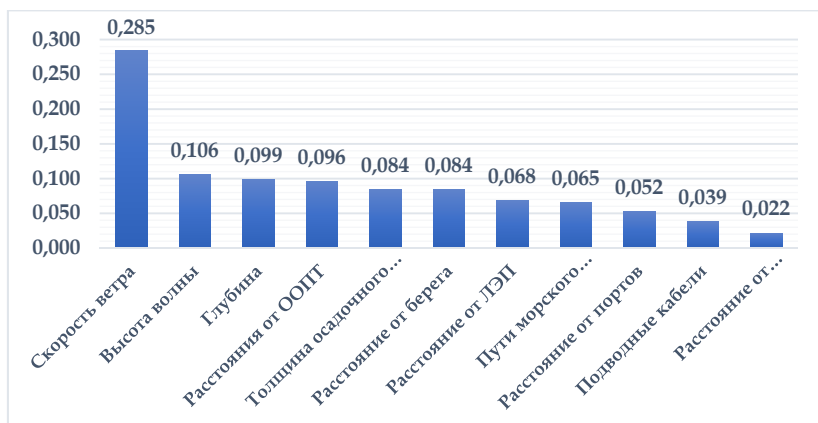


Рис. 1. Веса критериев

Как и ожидалось, наибольшим весом обладает критерий *скорость ветра*, что еще раз подтверждает его экзистенциальное значение для размещения ВЭС. Стоит также отметить, что именно такие географические, природные детерминанты, как высота волны и глубина, занимают лидирующие позиции в данном исследовании. Это еще раз подтверждает важность рассмотрения вопросов развития возобновляемой энергетики с позиции географической науки. Необходимо заметить и достаточно значимый вес критерия *расстояние до ООПТ*, что говорит о важности рассмотрения ветровой энергетики не только с позиции эффективности, но и с точки зрения заботы о сохранности окружающей среды.

Результаты расчета индекса пригодности представлены на рисунке 2. Для проведения сравнительно анализа территорий последние были разделены на 4 категории, представленные в таблице 6.

Таблица 6

Распределение значений индекса пригодности
и их доля в массиве полученных данных

Категория	Значения индекса	Доля значений в общем массиве, %
Установка ВЭС нежелательна	0	82,3
Низкий	0–0,5	0,8
Средний	0,5–0,7	12,2
Высокий	0,7–1	4,7

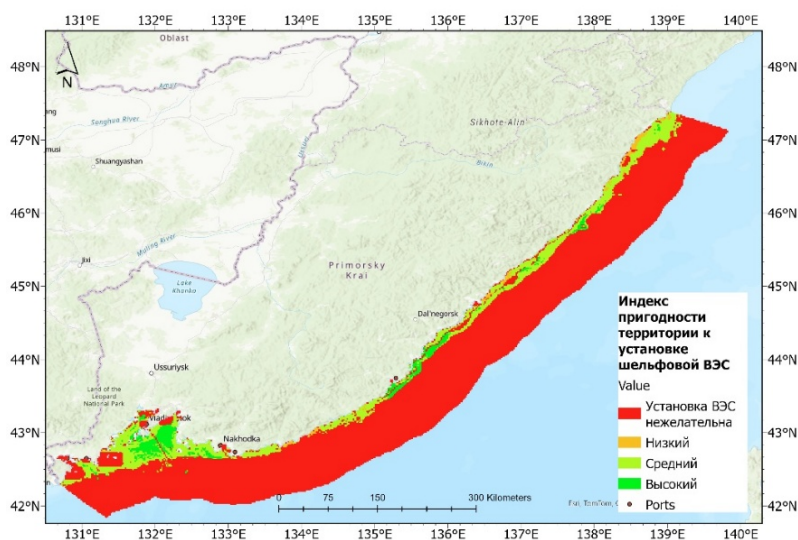


Рис. 2. Индекс пригодности территории к установке шельфовой ВЭС

Согласно полученному массиву, наиболее перспективные территории для размещения шельфовых ВЭС расположены в Уссурийском заливе, а также неподалеку от порта Ольга. В случае с Уссурийским заливом подобные результаты объясняются как достаточно высокими средними скоростями ветра (около 8 м/с, рис. 3), так и высоким уровнем развития соответствующей инфраструктуры.

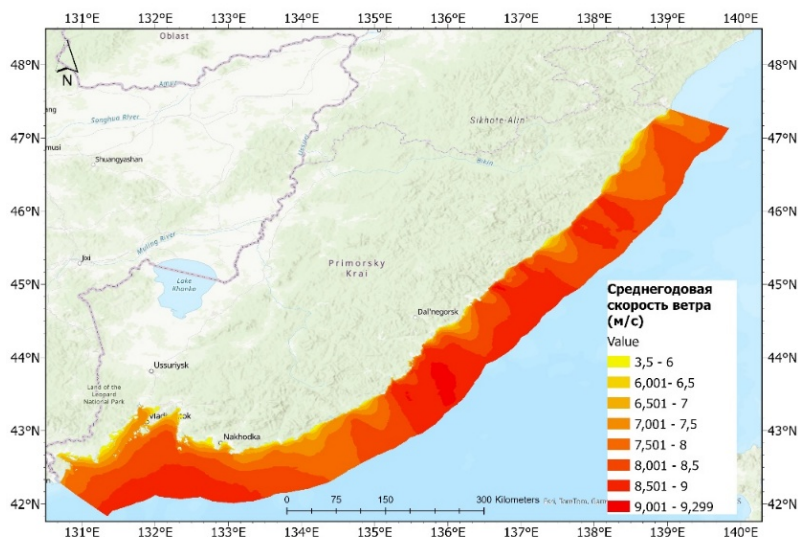


Рис. 3. Среднегодовая скорость ветра

Составлено по данным Global Wind Atlas.



Также на данном участке отмечены сравнительно небольшие значения высоты волн, что, с учетом значительного веса данного критерия согласно мнениям экспертов, достаточно важно. Кроме того, в этом районе расположен порт Владивосток, что станет безусловным подспорьем при реализации сценария развития водородной энергетики региона с использованием электроэнергии, полученной на ВЭС. Однако существенной деталью, которую необходимо учитывать при проектировании соответствующих станций, является активное судоходство в регионе, что выражено наличием проходящей через участок полосы территорий, подпадающих под категорию «установка ВЭС нежелательна». Зона со средним и местами высоким индексом пригодности продолжается на восток в направлении портов Находка и Восточный, однако там не формируется ярко выраженной группировки территорий с высокими значениями индекса, что связано с большими глубинами в данной локации. Несмотря на это, в береговой зоне присутствует полоса, характеризующая средними и высокими значениями индекса.

Высоким потенциалом могли бы обладать территории возле заливов Посыет и Амурского, однако они были исключены из анализа из-за близости ООПТ — Дальневосточного морского заповедника и Хасанского природного парка.

Как было отмечено ранее, высокие значения характерны и для территорий неподалеку от порта Ольга. Подобные показатели стали следствием совокупности причин, в том числе близости самого порта. При этом в данной локации встречаются высокие значения скорости ветра (вплоть до 9 м/с) относительно других прибрежных зон при глубине до 80 м, что дает серьезное преимущество для рассмотрения данной территории как перспективной для установки комплекса ВЭС.

Высокие значения среднегодовой скорости ветра (рис. 3) характерны и для залива Петра Великого, однако его глубина на отдалении от материка слишком велика. Нельзя забывать и о том, что расположение шельфовой ВЭС на большом отдалении от берега не столь эффективно, и большинство подобных станций локализованы не далее чем в 80–100 километров от берега, согласно исследованию С. Санчеза и др. [23]. Анализ, представленный в данной работе, показывает, что шельфовые ВЭС, расположенные в Азии, обычно размещаются ближе к берегу (до 50 км), чем в Европе, что, скорее всего, связано с различиями в прибрежной батиметрии данных регионов.

Заключение

Суммируя все вышесказанное, можно утверждать, что согласно представленной методике определения индекса пригодности к развитию шельфовой ветроэнергетики на исследуемой территории наиболее перспективно выглядят две зоны. Первая расположена в Уссурийском заливе и тянется до портов Находка и Восточный, постепенно сужаясь. Вторая протягивается полосой неподалеку от порта Ольга.



Если проводить сравнительный анализ, то каждая из зон обладает своими преимуществами и недостатками. Территории, находящиеся в Уссурийском заливе и рядом с ним, имеют весомое преимущество с точки зрения наличия развитой инфраструктуры. Если рассматривать вопрос с позиции не только производства электроэнергии, но и последующего производства «зеленого» водорода, здесь расположено несколько крупных портов, что с учетом меньшей стоимости при транспортировке водорода морским путем на дальние расстояния (характерные для Азиатско-Тихоокеанского региона) может стать большим подспорьем при проведении экспортной политики. Если же не учитывать вопрос «зеленого» водорода, то в упомянутом районе находится несколько крупных поселений, и наличие шельфовой ВЭС позволит произвести диверсификацию энергосистемы региона. Нельзя забывать и о проблеме энергодефицита на Дальнем Востоке, которая понималась в том числе и в рамках Дальневосточного экономического форума.

Территории у порта Ольга выделяются большими скоростями ветра, а также не таким плотным морским трафиком, что, безусловно, является преимуществом для размещения ВЭС. Однако в данном случае размещение подобной станции имеет больший смысл в связке с производством водорода, так как шельфовые ВЭС обычно обладают большой установленной мощностью, которая будет избыточной для рассматриваемого района, если речь идет о прямом потреблении электроэнергии. Впрочем, данный вопрос представляется темой для более подробного экономического анализа.

Подводя итоги, нельзя не затронуть и другие перспективные направления в исследовании развития шельфовой ветроэнергетики региона. Выделение перспективных территорий методом поиска индекса пригодности — один из первоначальных этапов оценки потенциала использования ВИЭ. Важным направлением является моделирование возможных скоростей ветра с использованием вероятностных моделей, в том числе распределения Вейбулла. Такое исследование уже проводилось для расчета потенциала производства электроэнергии и зеленого водорода на Дальнем Востоке, но для ВЭС, которые могут быть расположены на суше [27]. В подобных случаях основой моделирования служат эмпирические данные с существующих метеостанций. При расчетах, производимых для шельфовых ВЭС, перспективно использование данных ERA5 [28; 29]. Также нельзя забывать и об экономико-техническом анализе целесообразности подобного производства, включающем подбор как наиболее эффективных для конкретных условий турбин, так и установок для электролиза. Все подобные исследования в сумме могут дать наиболее приближенную к реальности картину, которая позволит точнее оценить потенциал возможностей использования ВИЭ в регионе.

Дальний Восток является стратегически важным регионом Российской Федерации, и его развитие, в том числе в парадигме возобновляемой энергетики, может стать большим подспорьем в дальнейшем всестороннем развитии страны.

Список литературы

1. Демидионов М.Ю. Альтернативная энергетика стран БРИКС: компаративный анализ // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, №2. С. 205–216. doi: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-205-216.
2. Суслов К., Дорошин А., Кабанов В., Переверзев Д. Анализ развития солнечной энергетики в России // Энергетическая политика. 2023. №7 (185). С. 26–45. EDN: NIIOLV.
3. Горбунова Т.Ю. Оценка ландшафтного потенциала Юго-Восточного Крыма для использования систем возобновляемой энергетики – солнечной и ветровой : дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь, 2019. EDN: ZOWEKE.
4. Демидионов М.Ю. Пространственное моделирование потенциала развития альтернативной энергетики на примере острова Сахалин // Тихоокеанская география. 2023. №4. С. 82–92. doi: 10.35735/26870509_2023_16_8. EDN: PDZYFQ.
5. Lazarev N.I., Kuznetsov N.M. Solar energy for power supply of remote consumers in Murmansk Region // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2024. №40. P. 55–58. doi: 10.26160/2474-5901-2024-40-55-58.
6. Киселева С.В., Лисицкая, Н.В., Попель О.С. и др. Геоинформационные системы для возобновляемой энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. №11. С. 115–127. doi: 10.56304/S0040363623110073. EDN: SNIADQ.
7. Juárez-Casildo V., Cervantes I., González-Huerta R. de G. Harnessing offshore wind for decarbonization: A geospatial study of hydrogen production and heavy industry utilization in Mexico // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 83. P. 701–716. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.142.
8. Karipoglu F., Ozturk S., Efe B. A GIS-based FAHP and FEDAS analysis framework for suitable site selection of a hybrid offshore wind and solar power plant // Energy Sustainable Development. 2023. Vol. 77. Art. №101349. doi: 10.1016/j.esd.2023.101349.
9. Barzehkar M., Parnell K., Soomere T., Koivisto M. Offshore wind power plant site selection in the Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 73. Art. №103469. doi: 10.1016/j.rsma.2024.103469.
10. Gil-García I.C., Ramos-Escudero A., García-Cascales M. S. et al. Fuzzy GIS-based MCDM solution for the optimal offshore wind site selection: The Gulf of Maine case // Renewable Energy. 2022. Vol. 183. P. 130–147. doi: 10.1016/j.renene.2021.10.058.
11. Díaz H., Loughney S., Wang J., Guedes Soares C. Comparison of multicriteria analysis techniques for decision making on floating offshore wind farms site selection // Ocean Engineering. 2022. Vol. 248. Art. №110751. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110751.
12. Taoufik M., Fekri A. GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development on Morocco // Energy Conversion and Management: X. 2021. Vol. 11. Art. №100103. doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100103.
13. Johnston B., Al Kez D., McLoone S., Foley A. Offshore wind potential in Northern Ireland using GIS multi-criteria assessment // Applied Energy. 2025. Vol. 378, Part A. Art. №124764. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124764.
14. Umoh K., Hasan A., Kenjegaliev A. Combined AHP-GIS methodology for floating offshore wind site selection in South Africa // Ocean Engineering. 2025. Vol. 317. Art. №120037. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120037.
15. Dimitriou I.C., Sarmas, E., Trachanas G.P. et al. Multi-Criteria GIS-based offshore wind farm site selection: Case study in Greece // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 207. Art. №114962. doi: 10.1016/j.rser.2024.114962.



16. Basaran H.H., Tarhan I. Investigation of offshore wind characteristics for the northwest of Türkiye region by using multi-criteria decision-making method (MOORA) // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16. Art. №100757. doi: 10.1016/j.rineng.2022.100757.

17. Berna C., Vargas-Salgado C., Alfonso-Solar D., Escrivá-Castells A. Hydrogen production from surplus electricity generated by an autonomous renewable system: Scenario 2040 on Grand Canary Island, Spain // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, №19. Art. №11884. doi: 10.3390/su141911884.

18. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации : распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 №136-ФЗ. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения 01.03.2023).

19. Saaty T. *The Analytic Hierarchy Process*. N. Y., 1980.

20. Krejčí J., Stoklasa J. Aggregation in the analytic hierarchy process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean // *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 114. P. 97–106.

21. Metegam I.F.F., Wolff E., Tchinda R. et al. Evaluation of on-grid and off-grid solar photovoltaic sites in Cameroon using geographic information systems, fuzzy logic, and multi-criteria analysis // *Energy*. 2025. Vol. 318. Art. №134614. doi: 10.1016/j.energy.2025.134614.

22. Hosseini-Doost S.E., Sattari A., Eskandari M. et al. Techno-Economy Study of wind energy in Khvaf in Razavi Khorasan Province in Iran // *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2016. Vol. 47, №1. P. 53–66. doi: 10.22059/jcamech.2016.59255.

23. Sanchez S., Lopez-Gutierrez J-S., Negro V., Esteban M.D. Foundations in Offshore Wind Farms: Evolution, Characteristics and Range of Use. Analysis of Main Dimensional Parameters in Monopile Foundations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 7, №12. Art. №441. doi: 10.3390/jmse7120441.

24. Vasileiou M., Loukogeorgaki E., Vagiona D. G. 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. Vol. 73. P. 745–757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161.

25. Baseer M.A. GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia // *Energy*. 2017. Vol. 141. P. 1166–1176. doi: 10.1016/j.energy.2017.10.016.

26. Schallenberg-Rodriguez J., Montesdeoca N. Spatial planning to estimate the offshore wind energy potential in coastal regions and islands. Practical case: The Canary Islands // *Energy*. 2018. Vol. 143. P. 91–103. doi: 10.1016/j.energy.2017.10.084.

27. Demidionov M. Green hydrogen production from wind energy in Far Eastern Federal District (FEFD), the Russian Federation // *Regional Sustainability*. 2025. Vol. 6, iss. 1. Art. №100199. doi: 10.1016/j.regsus.2025.100199.

28. Albani A., Syazwani S., Ibrahim M.Z. et al. Three-Parameter Weibull for Offshore Wind Speed Distribution in Malaysia // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2024. Vol. 39. P. 149–158. doi: 10.37934/araset.39.1.149158.

29. Ahmad S., Abdullah M., Kanwal A. et al. Offshore wind resource assessment using reanalysis data // *Wind Engineering*. 2022. Vol. 45, iss. 4. P. 1173–1186. doi: 10.1177/0309524X211069384.



Об авторе

Михаил Юрьевич Демидионов — канд. геогр. наук, доц., Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Россия.

E-mail: demidionovforwork@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6853-319X

SPIN-код: 4146-4913

M. Yu. Demidionov

ASSESSMENT PRIMORSKY KRAI COASTAL ZONE SUITABILITY FOR THE OFFSHORE WIND ENERGY DEVELOPMENT

The Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia

Received 30 March 2025

Accepted 26 June 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-5

To cite this article: Demidionov M. Yu., 2025, Assessment Primorsky Krai coastal zone suitability for the offshore wind energy development, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №3. P. 70–84. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-5.

The article addresses the identification of the most suitable coastal areas of Primorsky Krai for the installation of offshore wind farms, including the potential use of the generated electricity for the production of “green” hydrogen. The analytic hierarchy process, combined with fuzzy logic applied for the unification of absolute parameter values, was selected as the assessment method. Eleven criteria influencing the suitability of territories for wind farm deployment were analyzed. Six experts in the relevant field were surveyed to determine the weights of the criteria, and the absolute values were unified. After obtaining the suitability index, areas where wind farm installation was technically undesirable were excluded from consideration. As a result, the highest suitability values were identified in Ussuri Bay, in the coastal zone near the ports of Vostochny and Nakhodka, as well as in the vicinity of the port of Olga. The development of wind energy may serve as an important driver of regional growth both from a technological perspective and in addressing energy shortages, while the production of “green” hydrogen could establish the region as a major hub for hydrogen trade among the Asia-Pacific countries. All of the above correspond to national priorities as outlined in the Concept for the Development of Hydrogen Energy of the Russian Federation and the Energy Security Doctrine of the Russian Federation.

Keywords: offshore wind stations, Asia-Pacific region, Analytic Hierarchy Process, spatial analysis, green hydrogen, energy security

The author

Dr Mihail Yu. Demidionov, Associate Professor, The Herzen State Pedagogical University of Russia, Russia.

E-mail: demidionovforwork@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6853-319X

SPIN-код: 4146-4913