

Пространственное моделирование потенциала развития альтернативной энергетики на примере острова Сахалин

Михаил Юрьевич ДЕМИДИОНОВ

аспирант

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

Россия

demidionovforwork@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена оценке потенциала размещения на о. Сахалин электростанций для выработки энергии с применением альтернативных источников. Для проведения исследования был разработан алгоритм, который позволяет найти территории, пригодные для размещения ветровых и солнечных электростанций. Работа данного алгоритма производилась с помощью ПО ArcGISPro. Методика включает в себя комплексную оценку территории с использованием физико-географических, экономико-географических, а также ограничительных факторов, выполненную на основе пространственного анализа. В статье показана пошаговая структура работы алгоритма с описанием необходимых инструментов для проведения анализа. В результате были установлены территории, обладающие высоким потенциалом ветровой энергетики (рассчитанной с применением двух методов анализа – с учетом скорости ветра и плотности энергии ветра). Показано, что оба вышеупомянутых метода демонстрируют схожие результаты. Было установлено, что наибольшим потенциалом для размещения предприятий по выработке энергии на основе альтернативных источников обладают территории, расположенные в северо-западной и северо-восточной частях о. Сахалин. Особенно стоит выделить Охинский и Ногликский районы. В южной части острова можно отметить Корсаковский район с его потенциалом. Установлено, что в целом о. Сахалин не обладает достаточными условиями для развития солнечной энергетики, а локальные территории, пригодные для установки PV-панелей, расположены на юге острова. Сделан вывод о том, что удачное географическое положение о. Сахалин в Азиатско-Тихоокеанском регионе в сочетании с имеющимся потенциалом альтернативной энергетики обеспечивают хороший уровень инвестиционной привлекательности данного региона России, а развитие данного направления на Сахалине может быть одним из первых шагов в появлении «водородного» кластера на Дальнем Востоке.

Ключевые слова: пространственное моделирование, альтернативная энергетика, зеленый водород, Сахалин, ГИС

Для цитирования: Демидионов М.Ю. Пространственное моделирование потенциала развития альтернативной энергетики на примере острова Сахалин // Тихоокеанская география. 2023. № 4. С. 82–92. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_8. EDN: PDZYFQ.

Spatial modeling of the potential for alternative energy development on the example of Sakhalin Island

Mikhail Yu. DEMIDIONOV
Postgraduate
Herzen University, Saint-Petersburg, Russia
demidionovforwork@gmail.com

Abstract. The article is devoted to assessing the potential of placing power plants on Sakhalin for generating energy using alternative sources. Since the developed countries of the world (including Russia) have created their own concepts for the development of hydrogen energy, the topic of research in this area has a high degree of relevance. Alternative energy sources are an important factor for the production of green hydrogen – the most environmentally friendly variety of this type of fuel. Sakhalin can become a good platform for the production and subsequent export of green hydrogen. To conduct the study, an algorithm that allows to find territories suitable for hosting wind and solar power plants (one of the most popular types of alternative energy sources nowadays), was developed. This algorithm was verified on the basis of the ArcGIS Pro software. The article shows a step-by-step structure of the algorithm with a description of the necessary tools for analysis. ArcGIS Pro has all the necessary tools, but the work can be done in similar programs too, for example using QGIS. The methodology includes a comprehensive assessment of the territory using physical-geographical and economic-geographical factors, as well as restrictive zones, performed on the basis of spatial analysis. As a result, territories with a high potential of wind energy were identified (calculated using two methods of analysis – from wind speed and wind power density). Using correlation analysis, it was shown that both of the above methods demonstrate similar results. As a result of the study, it was found that the territories located in the north-western and north-eastern parts of Sakhalin have the greatest potential for placing energy production enterprises based on alternative sources. It is especially worth highlighting the Okhinsky and Nogliksky districts. At the southern portion of the island, one can note the potential of the Korsakov District. It has been found that Sakhalin does not have a significant predisposition to the development of solar energy, and that local territories suitable for the installation of PV panels are located in the south of the island. Taking into account the growing interest of Asian countries (China, India) in the imports of Russian resources, it is concluded that the successful geographical location of Sakhalin in the Asia-Pacific region, coupled with the calculated potential of alternative energy, provides a good level of investment attractiveness of this region of Russia. The development of this direction on Sakhalin may be one of the first steps in the emergence of the “hydrogen” cluster in the Far East.

Keywords: spatial analysis, alternative energy, green hydrogen, Sakhalin, GIS

For citation: Demidionov M. Yu. Spatial modeling of the potential for alternative energy development on the example of Sakhalin Island. *Pacific Geography*. 2023;(4):82-92. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_8.

Введение

В XXI в. взгляды мирового сообщества сконцентрировались на такой важной и актуальной проблеме как загрязнение окружающей среды. В связи с этим все чаще звучат призывы к достижению «углеродной нейтральности» и разрабатываются меры по снижению нагрузки на атмосферу и гидросферу. Несмотря на планы Правительства РФ пересмотреть стратегию низкоуглеродного развития на фоне ограничения доступа страны к соответствующим технологиям Запада, оно не игнорирует климатическую повестку и не стремится выйти из Парижского соглашения по климату, действующего с 2016 г. и направленного на сокращение глобальных выбросов парниковых газов.

Альтернативная энергетика является одним из краеугольных камней, на котором может и должно строиться безуглеродное будущее человечества. Одним из направлений ее применения является производство зеленого водорода, еще одного ключевого энергоносителя, на развитие потенциала которого направлены большие ресурсы многих стран мира. Ряд государств (в том числе и Россия) разработали свои стратегии по развитию водородной энергетики [1, 2]. Страной-пионером стала Япония, чья программа увидела свет в 2017 г., однако так как это событие случилось не так давно, можно утверждать, что исследования в данном направлении только начались и ждать серьезных результатов в ближайшие годы не стоит [3]. Этот вывод подтверждается и тем фактом, что большая часть стратегий составлена на период до 2050 г.

Ключевой проблемой, тормозящей процесс развития водородной энергетики, является дороговизна доставки водорода как между странами, так и до конечного потребителя. Многие стратегии ориентированы на то, что в связи с высокой скоростью развития современных технологий стоимость транспортировки со временем упадет, что приведет к ситуации, при которой торговля водородным топливом станет выгодной. Другой проблемой является вопрос размещения производства. Особенно остро он стоит для «зеленого» водорода, что объясняется необходимостью применения для процесса электролиза энергии, полученной за счет альтернативных источников (в первую очередь ветровых и солнечных станций) [4]. Одним из факторов успешного решения данной проблемы может стать использование географического подхода. Он позволит связать между собой различные стадии реализации проекта – от учета физико-географических условий размещения до конечного продукта экспорта.

В данном исследовании проведена оценка потенциала развития альтернативной энергетики (и как следствие – «зеленого» водорода) о. Сахалин. В связи с тем что одной из целей, поставленных правительством в вышеупомянутой стратегии [2], являлось занятие 20 % рынка экспорта водорода, при выборе мест производства важно учитывать такой благоприятный фактор, как близость к импортеру. Поскольку существуют торговые отношения РФ с Китаем и Индией, в том числе в рамках БРИКС, восточные территории страны могут стать удобным полигоном для становления водородного кластера России. Одной из ключевых точек может стать и о. Сахалин, который обладает не только физико-географическими преимуществами, но и экономическим потенциалом за счет расположения в Азиатско-Тихоокеанском регионе, а также наличия портов, которые с учетом дополнительных инвестиций могут быть модернизированы для торговли сжиженным водородом.

Целью данного исследования является оценка пригодности и потенциала территории о. Сахалин для размещения предприятий по производству «зеленого» водорода. Для достижения поставленной цели были изучены уже имеющиеся алгоритмы по оценке потенциала территории для размещения исследуемых производств; разработана модель оценки; подготовлены и обработаны необходимые данные (векторные и растровые) для анализа, а также подобран необходимый геоинформационный инструментарий; произведены тестовые запуски и финальный расчет для созданной модели; выделены наиболее перспективные территории.

Материалы и методы

Для оценки потенциала развития альтернативной энергетики о. Сахалин были выбраны два источника энергии – ветровой и солнечный. Факторы, учитываемые при расчетах, были подразделены на 3 группы: физико-географические (скорость ветра; суммарная солнечная радиация, включающая в себя прямую и рассеянную; высота поверхности над уровнем моря; уклон поверхности и экспозиция склона), экономико-географические (расстояние до важных инфраструктурных объектов, таких как железные дороги, линии электропередач, населенные пункты, а также порты) и ограничительные, например особо охраняемые природные территории, буферные зоны городов (для ВЭС).

На первом этапе были проведены расчеты для ветровой энергетики, затем для солнечной. Для получения итоговых результатов был применен алгоритм взвешенной суммы, который учитывал потенциалы обоих видов энергетики. Данные по скорости ветра были получены благодаря порталу Global Wind Atlas [5]. Важно отметить, что оценка ветровых показателей проводилась с учетом трех вариантов высоты самих ветроэлектрических установок (50, 100 и 150 м над поверхностью). Кроме того, в данной работе не учитывались технические характеристики самих «ветряков», такие как диаметр ротора и установленная мощность, т.к. несмотря на то, что вышеупомянутые показатели существенно влияют на эффективность выработки электроэнергии, в основе выбора тех или иных технических особенностей станции не лежит пространственный подход. Основой данного исследования является разработанный алгоритм модели пространственного анализа (рис. 1). С применением данной схемы возможно проводить расчеты для различных территорий, однако она может быть дополнена в первую очередь для учета экономико-географических различий. Подобные алгоритмы применялись в ряде научных работ по схожей тематике. При этом географический подход к проблеме позволяет производить оценку потенциала территории в различных масштабах. К примеру, египетские авторы Н. Effat и А. El-Zeiny в своей статье [6] описывают исследование потенциала альтернативной энергетики для территории мухафазы Асьют (Египет); в работе С. Groenewegen [7] подвергнута анализу территория европейского континента вместе со средиземноморским сектором Африки. При разработке алгоритма был учтен опыт предшественников, но данная схема воплощает в себе более комплексный подход (рис. 1).

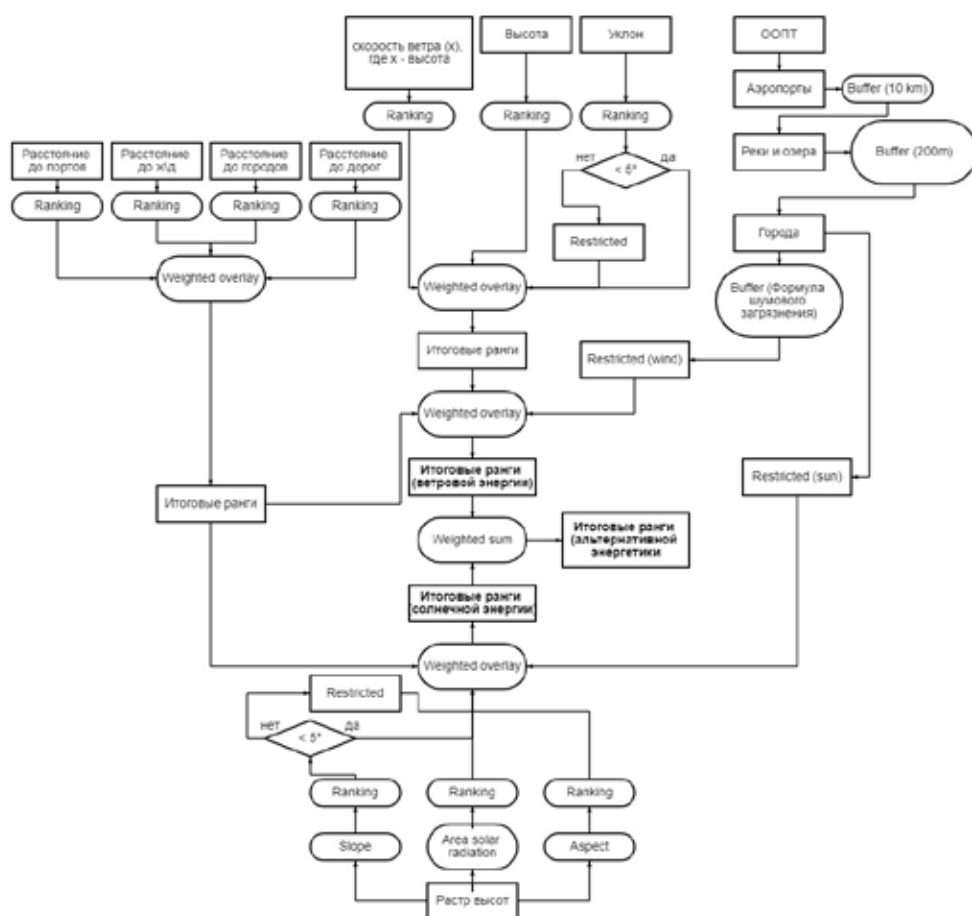


Рис. 1. Алгоритм модели пространственного анализа потенциала альтернативной энергетики о. Сахалин

Fig. 1. The model algorithm of spatial analysis of the potential Sakhalin alternative energy

Потенциальным дополнением для алгоритма может стать схема для анализа вероятного импорта энергоресурсов, как разработанная независимо (к примеру, на основе теории графов), так и на основе модели Хаффа (Huff model).

Моделирование потенциала ветроэнергетики. Для проведения расчетов учитываемые показатели были преобразованы в ранговую систему. Скорость ветра была классифицирована начиная с 4.5 м/с, т.к. более низкие показатели не считаются достаточно эффективными для коммерческого использования [8]. Более тонких настроек требуют показатели высоты местности. С одной стороны, более высокие территории имеют повышенную эффективность в связи с более стабильной скоростью ветра и меньшей турбулентностью. С другой стороны, необходимо учитывать плотность воздуха, которая с набором высоты, наоборот, уменьшается, что влияет на плотность энергии самого ветра. В результате было принято решение провести расчет относительно как скорости ветра, так и плотности энергии ветра в связи с тем, что последний фактор учитывает плотность воздуха на разной высоте.

Данные рельефа были взяты с цифровой модели рельефа SRTM (NASA Shuttle Radar Topography Mission), и преобразованы в систему координат WGS 84/ UTM Zone 54 (ESPG: 32654). Вышеупомянутая система была применена и для данных по скорости ветра. Высота над уровнем моря была ранжирована аналогично скорости ветра (табл. 1).

Таблица 1

Ранговая система показателей скорости ветра, высоты над уровнем моря и плотности энергии ветра

Table 1. Ranking of wind speed, elevation and WPD

Ранг	Скорость ветра, м/с	Высота над уровнем моря, м	Плотность энергии ветра (WPD)
1	4.5–5.4(9)	0–199	0–19.(9)
2	5.5–6.4(9)	200–399	20–59.(9)
3	6.5–7.4(9)	400–599	60–99.(9)
4	7.5–8.4(9)	600–799	100–134.(9)
5	8.5–9.4(9)	800–999	135–180.(9)
6	9.5–10.4(9)	1000–1199	181–238.(9)
7	10.5–11.4(9)	1200–1399	239–380.(9)
8	11.5–12.4(9)	>1400	381–659.(9)
9	>12.5	–	>660

Показатели плотности энергии ветра рассчитывались по методу, описанному Т. Hughes (университет Оклахомы) [9]. Данный метод регулярно применяется в рамках расчетов потенциала размещения ВЭС [6]. На первом этапе находилась плотность воздуха:

$$\rho = 1.225 - (1.194 * 10^{-4}) * z, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; z – высота над уровнем моря, м.

Затем с учетом полученных данных была рассчитана искомая плотность энергии:

$$WPD = 0.5 * K * \rho * V^3, \quad (2)$$

где WPD – плотность энергии ветра; $K = 1.91$; V – средняя скорость ветра, м/с.

Плотность энергии была классифицирована по рангам согласно методу оптимизации Дженкса (см. табл. 1). Данный подход был выбран в связи с тем, что он устанавливает границы там, где наиболее ярко проявляются скачки в диапазоне значений, в то же время относит к одному классу наборы данных, чьи показатели не так сильно различаются. Благодаря выбору данного метода можно сократить погрешности, вызванные различиями скорости ветра в разные годы.

После ранжирования ключевых показателей был получен потенциал ветроэнергетики без учета экономико-географических факторов и ограничений. При расчете использовался инструмент взвешенного наложения (weighted overlay), где имелось распределение долей (табл. 2), рассчитанное согласно методу суммы рангов (straight ranksum method) [10].

Таблица 2

Вес показателей при расчете потенциала ветроэнергетики

Table 2. The weight of indicators when calculating the potential of wind power

Показатель	Вес показателя, %	Ранг
Скорость ветра или WPD	50	1
Высота над уровнем моря	33	2
Уклон поверхности	17	3

Важно отметить, что уклон поверхности был классифицирован на 2 ранга – «1» и «0». Последний был присвоен территориям с запретом на постройку объектов ветроэнергетики (restricted). В качестве ограничения деятельности ВЭС были выбраны значения, превышающие 5°, хотя теоретически возможны показатели до 10°, однако в таком случае существенно вырастет стоимость строительства станции [11].

Вторым этапом получения данных по общему потенциалу ветроэнергетики стал расчет экономико-географических факторов размещения ВЭС. В качестве ключевых параметров были выбраны расстояния до крупных населенных пунктов, железных и автомобильных дорог, крупных портов о. Сахалин и линий электропередач. Полученные расстояния были ранжированы, и к полученным значениям был применен уже упомянутый выше метод взвешенного наложения. В данном случае вес распределялся равномерно, по 20 % на каждый параметр.

Третьим шагом стало выявление зон, где деятельность данного вида электростанций невозможна. В данном исследовании при расчете учтены следующие объекты: ООПТ, реки и озера (с учетом буферной зоны, составляющей 200 м), аэропорты (с учетом буферной зоны в 10000 м, в связи с воздушной турбулентностью вызываемой работой ВЭС). Как зоны-ограничения учитывались и населенные пункты, так как работа ВЭС вызывает шумовое загрязнение. Буферная зона в таком случае была рассчитана следующим образом [12]:

$$L_p = L_w - 10 \lg(2\pi R^2) - \alpha R \quad (3)$$

при $R^2 = H^2 + X^2$,

где H – высота турбины, м; X – расстояние до турбины, м; L_p – искомое звуковое давление (dB); L_w – звуковое давление турбины (dB).

Звуковое давление турбины было принято за 100 dB – стандартное значение для ВЭС. По итогам расчетов выяснилось, что несмотря на изначальные различия в показателях шумового загрязнения, для станций с разной высотой турбины с изменением дистанции различия нивелируются (табл. 3) и на расстоянии 1300 м значения достигают показателей, по данным ВОЗ пригодных для здорового сна [12] – 30dB.

Таблица 3

Показатели шумового загрязнения турбины ВЭС на различных расстояниях

Table 3. Indicators of noise pollution of wind turbine at various distances

Высота турбины	Звуковое давление 100 м (dB)	Звуковое давление 500 м (dB)	Звуковое давление 1300 м (dB)
50	50.3	38	29.7
100	47.3	37.8	29.7
150	43.7	37.4	29.6

В результате для населенных пунктов было принято решение установить значение буфера ограничения, равного 1300 м.

Для расчета итогового потенциала размещения «ветряков» растры физико-географических и экономико-географических потенциалов были объединены методом взвешенного наложения. Все территории, относящиеся к категории «ограничения», были

преобразованы в единый векторный слой и использованы как маска для получения итогового растра ВЭС.

Моделирование потенциала солнечной энергетики. Для получения данных по потенциалу солнечной энергетики были рассчитаны значения общего количества поступающей солнечной радиации (прямой и рассеянной). При выполнении данной задачи был применен инструмент Area Solar Radiation (ArcGIS Pro). В связи с тем что обработка ЦМР занимает большое количество времени, исследуемая территория была поделена на прямоугольники с шириной 1°. Данная операция позволила не только облегчить процесс вычисления, но и избежать погрешностей, так как каждой из полученных моделей рельефа задавались свои значения широты. После проведения расчета для каждого из участков они были объединены в общий растр. Погрешность на границах соединения растров составила не более 0.8 %.

Аналогично данным скорости ветра, количество солнечной радиации было ранжировано (табл. 4). Показатели менее 1100 кВт*ч/м² не учитывались, как коммерчески не выгодные.

Таблица 4
Ранговая система показателей суммарной солнечной радиации
Table 4. Ranking of global solar radiation

Ранг	Суммарная солнечная радиация, кВтч/м ²
1	1100–1200
2	1200–1300
3	>1300

В связи с тем что полученные значения говорят о малой пригодности территории к использованию солнечных батарей, присвоенные ранги (1–3) соответствуют аналогичным рангам, присвоенным территориям с малыми показателями скорости ветра.

Дальнейшие этапы алгоритма соответствуют описанным ранее для потенциала ВЭС, за следующими несколькими исключениями.

1. Не использовался буфер шумового загрязнения для населенных пунктов. В данном случае за ограничения были приняты их границы.

2. Вместо значимого для ветровой энергетики показателя высоты над уровнем моря были применены значения экспозиции склона. Учитывая географическое положение о. Сахалин в Северном полушарии, приемлемыми были выбраны склоны с южной, восточной, юго-западной и юго-восточной экспозицией.

3. Значения приемлемого уклона поверхности было увеличено до 10°.

Для создания итоговой растровой карты, учитывающей и ветровой, и солнечный потенциал, использовался инструмент взвешенной суммы (weighted sum). Для анализа итоговых результатов растры были преобразованы в полигоны, для которых была рассчитана геометрия.

Результаты и их обсуждение

В результате было получено несколько массивов данных: потенциал солнечной энергетики, потенциал ветровой энергетики от скорости ветра и от плотности энергии, суммарный потенциал (солнечная и ветровая).

Таблица 5
Итоговые данные по потенциалу солнечной энергетики
Table 5. Summary data on the potential of solar energy

Ранг	Площадь, км ² (доля в общей площади о. Сахалин, %)
0	57627 (79.5 %)
1	2010 (0.29 %)
2	7.3 (0.01 %)

Как было упомянуто выше, полученные значения говорят о малой пригодности территории к активному использованию солнечных батарей (табл. 5). Данный тип электростанций может решать локальные задачи, но его сложно рассматривать в качестве энергоносителя для производства «зеленого» водорода.

Большая часть острова либо непригодна к использованию ввиду указанных выше ограничений, либо имеет нулевой потенциал. Удовлетворяющие условиям для использования солнечных панелей участки сконцентрированы в Корсаковском, Анивском, Невельском и Холмском районах.

Куда большим потенциалом обладает ветровая энергетика острова. Так как расчет производился сразу по 2 методикам, в зависимости от скорости ветра (табл. 6) и от плотности энергии (табл. 7), необходимо вычислить критические различия между выборками.

Таблица 6

Итоговые данные по потенциалу ветровой энергетике от скорости ветра

Table 6. Summary data on the potential of wind energy by wind speed

Высота турбины, м	Площадь, км ² (доля в общем площади о. Сахалин, %)						
	0	1	2	3	4	5	6
50	21046 (29)	8323 (11.5)	11269 (15.5)	1774 (2.4)	21.3 (0.3)	4.5 (<0.01)	1 (<0.01)
100	29699 (41)	3653 (5)	16530 (22.8)	5178 (7.1)	197 (0.3)	5.5 (<0.01)	1.1 (<0.01)
150	30510 (42)	586 (0.8)	12409 (17.1)	12452 (17.2)	466 (0.6)	6.7 (0.01)	1.3 (<0.01)

Таблица 7

Итоговые данные по потенциалу ветровой энергетике от плотности энергии

Table 7. Summary data on the potential of wind energy by WPD

Высота турбины, м	Площадь, км ² (доля в общем площади о. Сахалин, %)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	15.8 (0.02)	31163 (42.9)	10023 (13.8)	12418 (17.1)	3281 (4.5)	894 (1.2)	110 (0.15)	13.7 (0.02)	0
100	11.8 (0.02)	30816 (42.5)	1007 (1.4)	6175 (8.5)	11240 (15.5)	6164 (8.5)	2412 (3.3)	29 (0.04)	1.8 (<0.01)
150	11.8 (0.02)	30805 (42.5)	201 (0.3)	1889 (2.6)	4743 (6.5)	9059 (12.5)	10076 (13.9)	1069 (1.5)	2.5 (<0.01)

Корреляционный анализ, проведенный между растрами потенциалов с учетом скорости ветра и плотности энергии, показал, что существенных различий не наблюдается (при 150 м – $r = 0.82$; 100 м – $r = 0.79$; 50 м – $r = 0.64$), следовательно, оба метода демонстрируют схожую точность. Снижения коэффициента в зависимости от уменьшения высоты турбины объясняется увеличивающейся плотностью воздуха.

Все три полученных набора пространственных данных о потенциале размещения альтернативной энергетики свидетельствуют о следующем: наиболее подходящие для размещения электростанций территории расположены в северо-западной и северо-восточной частях острова (рис. 2). В случае моделирования с учетом только скорости ветра это северо-запад Охинского района, территории рядом с г. Оха, а также окрестности зал. Пильтун. По результатам анализа с учетом плотности энергии следует особенно выделить прибрежную часть Ноглинского района, как обладающую наиболее весомым потенциалом. Для обеих моделей можно отметить наличие большого потенциала развития ветровой энергетики в районе оз. Тунайча, где помимо удачного сочетания учитываемых факторов можно отметить близость к крупным портам о. Сахалин, таким как Корсаков, а также к вероятным рынкам сбыта – странам Азиатско-Тихоокеанского региона.

Помимо упомянутых выше территорий стоит выделить и ряд локальных участков, где наблюдаются довольно высокие показатели потенциала, а именно: Поронайский район (его западная часть), запад Томаринского района (около с. Ильинское).

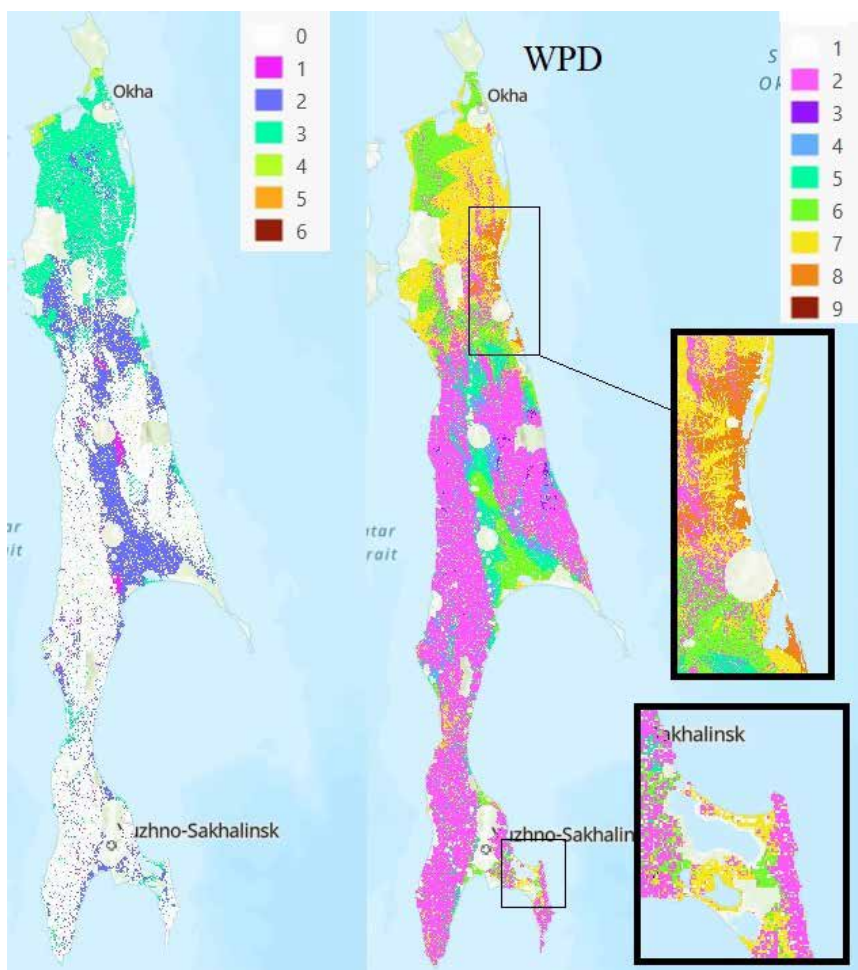


Рис. 2. Растровые карты потенциала размещения объектов альтернативной энергетики, выраженного в рангах от 1 (низкий) до 9 (высокий), по результатам анализа взвешенной суммы. Слева – итоговый потенциал суммы ветровой (высота турбины 150 м, расчет ведется от скорости ветра, значение на карте соответствует полученному рангу) и солнечной энергетики; справа – итоговый потенциал суммы ветровой (высота турбины 150 м, расчет ведется от плотности энергии ветра) и солнечной энергетики

Fig. 2. Raster maps of the placement potential of alternative energy facilities, expressed in ranks from 1 (low) to 9 (high), based on the results of the weighted sum analysis. On the left – the final potential of the sum of wind (turbine height is 150 meters, the calculation is based on wind speed, rankings system) and solar energy, on the right – the final potential of the sum of wind (turbine height is 150 meters, the calculation is based on WPD) and solar energy

Заключение и выводы

В рамках исследования была проведена апробация модели оценки потенциала территории к размещению производств «зеленого» водорода. В результате проведенного анализа можно утверждать, что о. Сахалин имеет достаточный потенциал для развития альтернативной энергетики, мощности которой можно использовать для электролиза при производстве «зеленого» водорода. В первую очередь речь идет об энергии, получаемой с помощью ветра, учитывая не высокий «солнечный» потенциал острова. Помимо размещения наземных ВЭС, можно рассматривать и шельфовые станции, аналогичные британской London Array [13].

Наиболее высоким потенциалом обладают восточные и северо-восточные территории острова. Особенно важно отметить Охинский и Ноглинский районы. Также для размещения производства можно рассматривать и юго-восточные районы, где важным фактором является наличие как крупнейших городов острова, так и портов, имеющих потенциал модернизации.

Важно отметить и выгодное географическое положение о. Сахалин в Азиатско-Тихоокеанском регионе, что может серьезно снизить затраты на транспортировку водородного топлива. Учитывая все более активный поворот РФ в сторону Азии, можно предполагать, что именно страны АТР станут основными импортерами российского сырья. Создание кластера по производству водорода в Дальневосточном регионе может заложить крепкий фундамент для достижения поставленных целей.

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что данный регион имеет достаточный потенциал развития производства «зеленого» водорода, и при необходимом количестве инвестиций это может помочь России сохранить и, возможно, увеличить свою долю на мировом рынке энергоресурсов к середине–концу XXI в.

Литература

1. Patel S. Countries roll out green hydrogen strategies, electrolyzer targets. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.powermag.com/countries-roll-out-green-hydrogen-strategies-electrolyzer-targets/> (дата обращения: 01.02.2023).
2. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 05 августа 2021 № 2161-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения: 25.01.2023).
3. Iida S., Sakata K. Hydrogen technologies and developments in Japan // *Clean Energy*. 2019. N 3(2). P. 1–9.
4. Министерство науки и высшего образования РФ. Ученые нашли способ получения недорогого «зеленого» водорода. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/59513/#:~:text=«Зеленый»%20водород%20получают%20методом%20электролиза,себе%20считается%20самым%20чистым%20топливом> (дата обращения: 01.02.2023).
5. Global Wind Atlas. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globalwindatlas.info/ru> (дата обращения: 06.01.2023).
6. Effat H., El-Zeiny A. Geospatial modeling for selection of optimum sites for hybrid solar-wind energy in Assiut Governorate, Egypt. // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2020. N 25. P. 627–637.
7. Groenewegen C. GIS-based site suitability analysis for solar and wind to hydrogen potential in Europe and Mediterranean region in 2030 and 2040. Delft University of Technology. 2021. 170 p.
8. Renewables first. How windy does it have to be? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/windpower-learning-centre/how-windy-does-it-have-to-be/> (дата обращения: 06.01.2023).
9. Hughes T. (2000). Calculation of Wind Energy and Power. Lesson Number 1 in an Oklahoma Wind Power Tutorial Series. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.seic.okstate.edu/owpi_old/about/library/lesson1_windedenergycalc.pdf (дата обращения: 06.01.2023).
10. Zelenakova M., Gargar I., Purcz P. Multicriteria analysis in hazards assessment in Libya // *Selected Scientific Papers – Journal of Civil Engineering*. 2012. N 7 (2). P. 59–70.
11. Serwan M.J., Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK // *Renewable Energy*. 2001. N 24 (1). P. 59–71.
12. World Health Organization. Noise. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/noise> (дата обращения: 06.01.2023).
13. London Array. About London Array. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://londonarray.com/> (дата обращения: 15.01.2023).

References

1. Patel, S. Countries roll out green hydrogen strategies, electrolyzer targets. [Электронный ресурс]. Available online: <https://www.powermag.com/countries-roll-out-green-hydrogen-strategies-electrolyzer-targets/> (accessed on 01 February 2023).
2. Government of the Russian Federation. Order of August 5, 2021 No. 2161-p. Available online: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (accessed on 25 January 2023). (In Russian)

3. Iida, S.; Sakata, K. Hydrogen technologies and developments in Japan. *Clean Energy*. 2018, 3(2), 1-9.
4. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Scientists have found a way to produce inexpensive “green” hydrogen. Available online: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/59513/#:~:text=«Зеленый»%20водород%20получают%20методом%20электролиза,себе%20считается%20самым%20чистым%20топливом>. (accessed on 1 February 2023). (In Russian)
5. Global Wind Atlas. Available online: <https://globalwindatlas.info/ru> (accessed on 6 January 2023).
6. Effat, H.; El-Zeiny, A. Geospatial modeling for selection of optimum sites for hybrid solar-wind energy in Assiut Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2020, 25, 627-637.
7. Groenewegen, C. GIS-based site suitability analysis for solar and wind to hydrogen potential in Europe and Mediterranean region in 2030 and 2040. Delft University of Technology. 2021; 170 p.
8. Renewables first. How windy does it have to be? Available online: <https://www.renewablesfirst.co.uk/wind-power/windpower-learning-centre/how-windy-does-it-have-to-be/> (accessed on 6 January 2023).
9. Hughes, T. (2000) Calculation of Wind Energy and Power. Lesson Number 1 in an Oklahoma Wind Power Tutorial Series. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.seic.okstate.edu/owpi_old/about/library/lesson1_windenergycalc.pdf. (дата обращения: 06.01.2023).
10. Zelenakova, M.; Gargar, I.; Purcz, P. Multicriteria analysis in hazards assessment in Libya. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*. 2012, 7, 59-70.
11. Serwan, M.J.; Parry, T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable Energy*. 2001, 24(1), 59-71.
12. World Health Organization. Noise. Available online: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/noise> (accessed on 6 January 2023).
13. London Array. About London Array. Available online: <https://londonarray.com/> (accessed on 15 January 2023).

Статья поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 02.03.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 10.05.2023.

