

УДК 621. 47

С.П. Кошкин¹

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ (НА ПРИМЕРЕ ШТАТА РИУ-ГРАНДИ-ДУ-НОРТИ, БРАЗИЛИЯ)

Статья посвящена оценке потенциала развития ветровой энергетики на региональном уровне. Такая оценка позволяет определить стратегию развития ветровой энергетики в масштабе административно-территориальных единиц государства. В отношении Бразилии в целом и штата Риу-Гранди-ду-Норти в частности данное исследование является актуальным ввиду активного развития отрасли и ее государственной поддержки в многолетней перспективе. В ходе исследования установлено влияние различных факторов на формирование потенциала развития ветровой энергетики на территории, в том числе ветроэнергетического потенциала, ландшафтной структуры, доступности электросетей. Выявлено, что развитие ветровой энергетики в регионе на данный момент не является оптимальным.

Ключевые слова: ветроэнергетический потенциал, ветроэнергетические ресурсы, ветроэнергетические проекты, стратегия развития, Бразилия

Введение. Оценка потенциала развития ветровой энергетики на региональном уровне позволяет определить стратегию развития ветровой энергетики в масштабе административно-территориальных единиц государства. Задача работы – типологизировать потенциал развития ветровой энергетики территории, который определяется нами на основе таких факторов, как ветроэнергетические ресурсы территории, текущая структура использования земель, существующая инфраструктура региона, техническая характеристика ветряных турбин. Большинство исследований сводятся к оценке ресурсов [Van Wijk, 1993; NREL, 1997], не включая в себя оценку ландшафтной структуры и экономических факторов, за исключением работы М. Хугвийк [2004], где произведена оценка ветроэнергетического потенциала на глобальном уровне с учетом доступности территории и стоимости производства электроэнергии. В рамках научной работы была разработана и применена авторская методика оценки потенциала развития ветровой энергетики на региональном уровне – на уровне субъекта государства. Потенциал развития определяет степень реализуемости энергетических проектов на территории, исходя из основных физико- и экономико-географических и экологических факторов. По результатам анализа выпусков «Вестника Московского университета» серии География за последние 10 лет, тематика возобновляемых источников энергии затрагивалась однажды [Березкин, Синюгин, Соловьев, 2013].

В Бразилии ветровая энергетика активно развивается, несмотря на доминирующий топливный сектор, обеспечивающий весомую часть экспорта ресурсов. За 2015–2016 гг. среднегодовой рост общей установленной мощности ветроэнергетических установок достиг 30%. Общая мощность в 2016 г. достигла 9,65 ГВт, объем генерации электроэнергии – 20,6 ТВт ч, составив 3,8% от общего произ-

водства электроэнергии в стране [Associação Brasileira de Energia Eólica, 2016].

Правительством Бразилии в 2015 г. принята Программа финансирования энергетической отрасли (Programa de Investimento em Energia Elétrica, PíEE), согласно которой на строительство 4–6 ГВт ветроэнергетических мощностей выделили около 5 млрд долларов в течение 2015–2018 гг. [Mayer Brown, 2015]. Ожидается, что в 2019 г. общий объем установленных ветроэнергетических мощностей в Бразилии достигнет 18,8 ГВт при среднем годовом росте общей мощности ветровых энергетических станций (ВЭС) страны 20% в год [Brazil Wind Power 2016 Conference and Exhibition].

Ветровая энергетика имеет широкую общественную поддержку, что связано с увеличением доходов населения и экономическим ростом страны [Simas, Passa, 2013]. Однако в настоящее время Бразилия находится в экономическом кризисе, что ставит под сомнение реализацию принятых программ, в том числе по части развития возобновляемых источников энергии и конкретно ветровой энергетики. Остается неясным, будет ли и в какой степени Бразильский Банк Развития (Brazilian Development Bank, BNDES) поддерживать финансирование ветроэнергетических проектов.

Территория исследования. Для оценки на региональном уровне был выбран бразильский штат Риу-Гранди-ду-Норти – он обладает самыми высокими ветроэнергетическими ресурсами на единицу территории в стране (7,4 м/с при средней по стране в 4,5 м/с) и занимает первое место по объему установленных ветроэнергетических мощностей (3 024 МВт) [The Wind Power, 2016]. Штат расположен на востоке Бразилии, там, где береговая линия южноамериканского материка меняет юго-восточное-восточное простирание на южное.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИ лаборатория возобновляемых источников энергии, инженер; e-mail: spkoshkin@gmail.com

Риу-Гранди-ду-Норти находится в зонах субэкваториального сезонно-влажного климата (большая часть штата) и тропического пассатного влажного климата (восточное побережье). На большей территории штата наблюдается смена сухого и влажного сезонов, чередование экваториальных и тропических муссонов [Лукашова, 1958], в то время как на Атлантическое побережье оказывают влияние океанические антициклоны. Сочетание данных условий формирует уникальное распределение основных направлений ветров на территории штата (рис. 1).

Результатом того, что Риу-Гранди-ду-Норти находится на границе климатических зон, стало разнообразие типов растительности. Большая часть штата занята растительным сообществом каатинга, север-

ное побережье занято дюнами, поймы крупных рек – пойменными лесами и лугами [Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente, 2002]. Дешифрирование космических снимков изучаемой территории показало, что наибольшее антропогенное воздействие претерпела восточная прибрежная полоса штата, которая более не представляет из себя лесную территорию и занята в основном пашнями и населенными пунктами. Лесные участки, по большей части, сосредоточены на северной прибрежной полосе.

Материал и методы исследований. В данном исследовании использованы различные методы геоинформационного картографирования. Результирующие карты создавались путем поэтапного введения данных в ГИС-приложение.

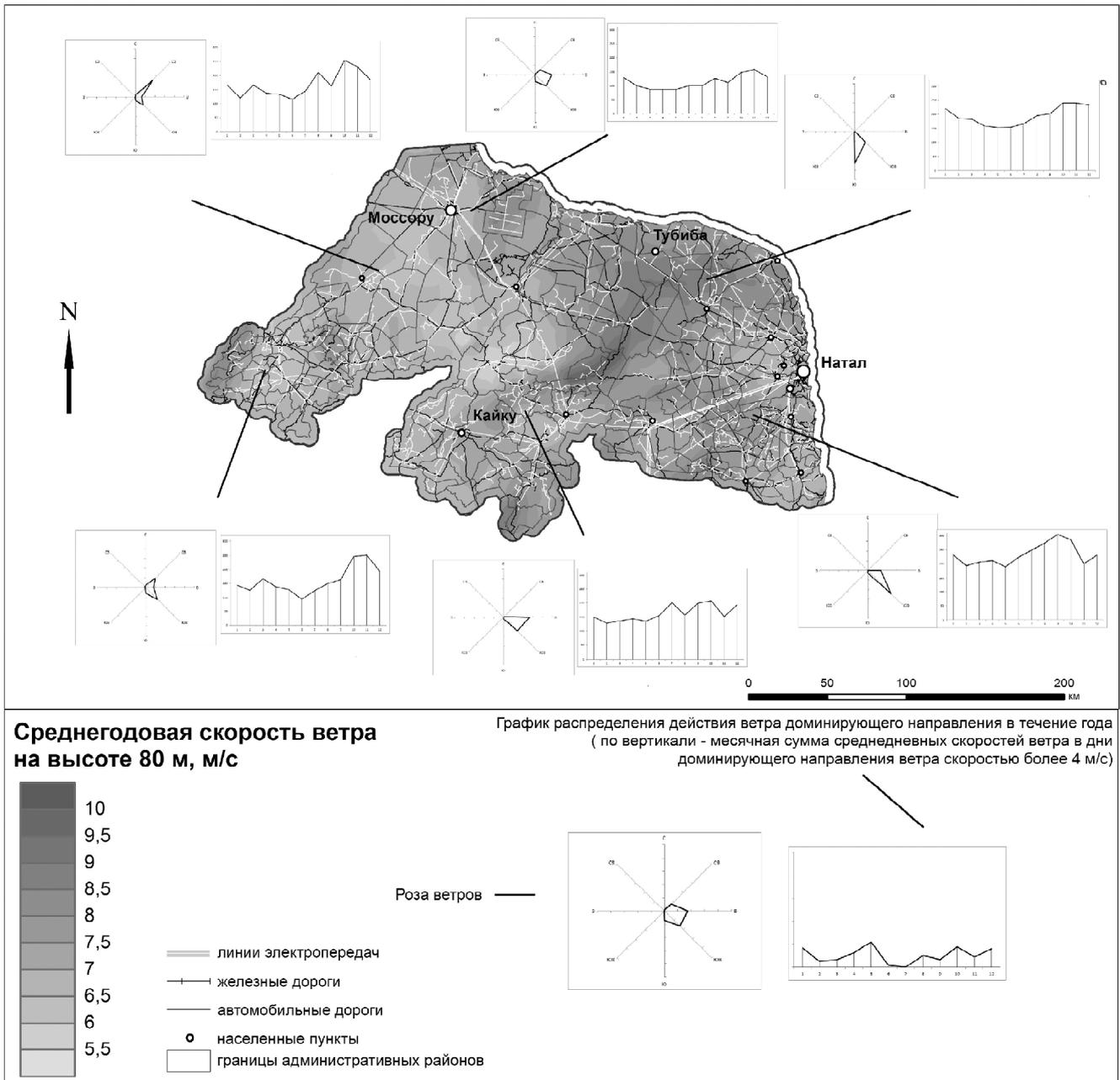


Рис. 1. Ветроэнергетические ресурсы на высоте 80 м на территории штата Риу-Гранди-ду-Норти

Fig. 1. Wind power resources at 80 m above the ground over the territory of the Rio Grande do Norte state

1) Современная инфраструктура штата Риу-Гранди-ду-Норти была позаимствована с ресурса Open Street Map и (ЛЭП) из атласа ветроэнергетического потенциала Риу-Гранди-ду-Норти [COSERN, 2003].

2) Определение типов поверхности происходило путем ручного и автоматического с ручной классификацией дешифрирования космических снимков Digital Globe разрешением 1 м.

3) Поле значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 80 м получено путем оцифровки (интерполяция методом «естественного соседства» (англ. Natural Neighbor)) соответствующей карты на территории Бразилии [AWS Truepower, 2012].

4) Данные по среднедневной скорости и направлению ветра взяты с ресурса Gismeteo [2017].

5) Пересчет скорости ветра на высоту ветряной турбины производился по формулам $U = U_{\phi} \cdot K_h$ (U – скорость ветра на высоте ветряной турбины, U_{ϕ} – скорость ветра на высоте анемометра, K_h – поправочный коэффициент высоты), где $K_h = (H/h_{\phi})^m$, где H – высота ветряной турбины, h_{ϕ} – высота анемометра на метеостанции, m – показатель степени, принимаемый в зависимости от скорости ветра на высоте анемометра [Елистратов, Кузнецов, 2003].

Результаты исследований и их обсуждение. Как мы видим из рис. 1, значительная часть территории Риу-Гранди-ду-Норти обладает очень хорошим ветроэнергетическим ресурсом: среднегодовой скоростью ветра порядка 7–9 м/с в год – это возвышенности Санта-да-Сантана в центре штата, Санта-ду-Карму на северо-западе, Санта-ду-Фейтисейро на северо-востоке, Сан-Висенти на юго-западе и Санта-дас-Кеймадас на юге. Остальная территория штата обладает хорошими и достаточными ветроэнергетическими ресурсами, и только некоторые территории (отдельные участки долин рек Аподи, Парау и Пираньяс) – недостаточными ветроэнергетическими ресурсами.

Однако распределение ветроэнергетических ресурсов в течение года неравномерно. С помощью данных портала Gismeteo на каждый день о скорости и направлении ветра на метеостанциях Риу-Гранди-ду-Норти были произведены соответствующие расчеты, составлены розы ветров и графики годового хода. Выявлено, что основная часть ветроэнергетических ресурсов на территории Бразилии приходится на весну – начало лета. Данное обстоятельство связано с взаимодействием тропических и умеренных воздушных масс, образующих холодные фронты, сопровождающиеся шквальными ветрами до 20 м/с [Хромов, Петросянец, 2013].

Фактическая возможность установки ВЭС определяется технической доступностью территории и наличием потребителя. Доступность территории штата крайне высокая, что ясно из ландшафтной структуры (раздел Территория исследования). Наличие потребителя определяется близостью к электропроводящей инфраструктуре. Основные объемы линий электропередач тяготеют к населенным пунктам, сосредотачиваясь на востоке штата, но они и пересекают всю территорию штата, что позволяет

развивать ветровую энергетику практически везде в Риу-Гранди-ду-Норти. Основная часть существующих ветряных электростанций расположена на северо-востоке штата [The Wind Power, 2016], где большие перспективы для развития ветровой энергетики ввиду постоянных и сильных ветров (с доминирующим южным направлением).

Для учета всех вышеперечисленных факторов была создана карта типов территории по потенциалу развития ветровой энергетики на участке исследования (рис. 2).

Для создания карты использован дополнительный ряд параметров. В Бразилии существуют нормы шумового загрязнения. Так как ветряные турбины оказывают шумовое воздействие, было рассчитано расстояние, на котором шум от ветряной турбины соответствует нормам шумового загрязнения (30 дБ, стандарт NBR10152) – такое расстояние для ветряных турбин высотой 80 м составило 1 250 м [Watt, 2006].

Еще один учтенный параметр – турбулентность от физических препятствий. Согласно исследованиям [CAT, 2017], зона турбулентности от препятствия составляет 10 высот препятствия. Основными высотными препятствиями на пути воздушных масс на местности являются здания и деревья. Для городских окраин характерны одно- и двухэтажные дома, высотой до 10 м, с соответствующей зоной турбулентности до 100 м, что меньше, чем «санитарные» зоны городов, обнаруженные ранее в ходе исследования. Таким образом, остается рассчитать зоны турбулентности лесных территорий. Средняя высота тропических лесов составляет 50 м [Лукашова, 1958], значит, их зона турбулентности равна 500 м.

Согласно рис. 2, территории с наиболее подходящими условиями для развития ветровой энергетики находятся в восточной половине штата. Здесь существует наилучшее сочетание факторов – высокие среднегодовые скорости ветра, наличие потребителя (населенных пунктов) и соответствующей инфраструктуры (линий электропередач), также здесь доминируют луга, кустарники и пашня с малым участием лесных территорий. Широко доступен для развития ветровой энергетики и юг штата. Большие территории для расположения ветроэнергетических станций находятся на северо-западе Риу-Гранди-ду-Норти, однако там ветроэнергетические ресурсы значительно меньше по объему. Западные и юго-западные земли штата относятся к малодоступным территориям.

Выводы.

Наличие материалов широкого спектра позволило провести подробное исследование ветроэнергетического потенциала территорий для разработки стратегии развития ветровой энергетики на региональном уровне:

– наилучшие условия для развития ветровой энергетики в регионе созданы там, где наблюдается сочетание высоких показателей скорости ветра, наличия потребителя и электропроводящей инфраструктуры (типы территории 4–5, рис. 2); для Риу-

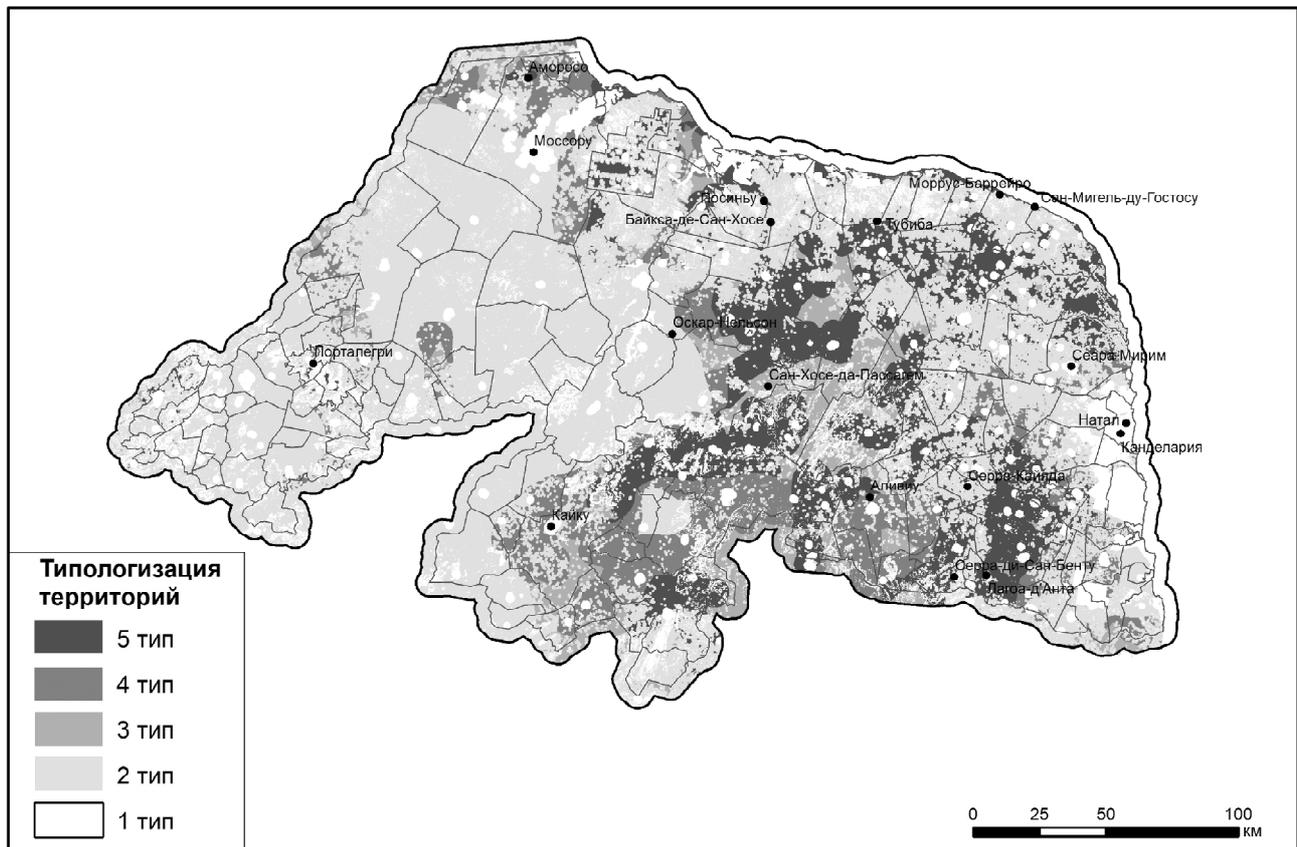


Таблица определения типа территории по потенциалу развития ветровой энергетики*

Типологизация территорий согласно оценке потенциала развития ветровой энергетики	Городские, лесные, водные, ООП территории, уклоны поверхности более 10°	Шумовые санитарные зоны** городских территорий	Зоны турбулентности*** лесных территорий	5-километровая доступность от городских территорий и ЛЭП	Среднегодовая скорость ветра (м/с)****
1 тип (недоступные)	да	да	-	-	< 3,5
2 тип (малодоступные)	нет	нет	да	-	3,5-6,9
3 тип (относительно перспективные)	нет	нет	нет	нет	> 6,9
4 тип (перспективные)	нет	нет	нет	да	6,9-7,5
5 тип (наиболее перспективные)	нет	нет	нет	да	> 7,5

*Тип определяется через первое положительное соответствие территории данным таблицы согласно приоритету
 **Согласно нормам шумового воздействия в Бразилии (30 дБ) и шумовому воздействию ветряной турбины высотой 80 м, санитарная зона от жилых территорий составит 1250 м
 ***Согласно средней высоте деревьев тропических лесов (50 м) и средней зоне турбулентности от препятствий (10 высот объекта), зона турбулентности лесных территорий составит 500 м
 **** Градация скоростей ветра произведена согласно техническим показателям ветряных турбин и классификации университета Стэнфорда (Archer, Jacobson, 2005)

Приоритет факторов

Рис. 2. Оценка потенциала развития ветровой энергетики на региональном уровне (штат Риу-Гранди-ду-Норти, Бразилия)

Fig. 2. Assessment of wind power potential at the regional level (the Rio Grande do Norte state, Brazil)

Гранди-ду-Норти такими территориями являются центр и юго-восток штата, которые еще в малой степени освоены с точки зрения ветровой энергетики. В этом видится дальнейшая перспектива развития отрасли здесь;

– препятствием к развитию ветровой энергетики являются низкие показатели скорости ветра и широкое распространение лесных территорий (типы территории 1–2, рис. 2); для Риу-Гранди-ду-Норти

одной из проблем является спорадическое распространение остатков тропического леса на севере и северо-востоке штата, что отрицательно влияет на эффективность части действующих ветроэнергетических установок;

– предложенная методика оценки потенциала развития ветровой энергетики на региональном уровне универсальна и может быть использована для проведения подобной оценки на других территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А.* География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетики мира // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. Вып. 1. С. 28–32.
- Лукашова Е.Н.* Южная Америка. Физическая география. М.: Учпедгиз, 1958. 464 с.
- Хромов С.П., Петросянуц М.А.* Метеорология и климатология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. 584 с.
- Associação Brasileira de Energia Eólica Boletim de Dados, Abril 2016. 2016. URL: <http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Abril-2016-Publico.pdf>. (дата обращения: 12.01.2018)
- AWS Truepower Wind Resource Map of Brazil. 2012. URL: <https://www.awstruepower.com/knowledge-center/maps/> (дата обращения: 12.01.2018)
- CAT Where should I put a wind turbine? // Centre for Alternative Technology, 2017 г. URL: <http://info.cat.org.uk/questions/wind/where-should-i-put-wind-turbine/> (дата обращения: 12.01.2018)
- COSERN Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte. 2003. URL: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfs0cAH/atlas-eolico-rn?part=7> (дата обращения: 12.01.2018)
- Gismeteo Дневник погоды. 2017. URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/> (дата обращения: 12.01.2018)
- Hoogwijk M.M.* On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources // Utrecht University, 2004. URL: <http://np-net.pbworks.com/f/Hoogwijk+%282004%29+Global+and+regional+potential+of+renewable+energy+sources+%28Thesis+Utrecht%29.pdf> (дата обращения: 12.01.2018)
- IDEMA Tipos de vegetação encontrados nas diferentes áreas geográficas do Rio Grande do Norte // Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte, 2002. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-566X2007000100016 (дата обращения: 12.01.2018)
- National Renewable Energy Laboratory Wind Resource Assessment Handbook. 1997. URL: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/22223.pdf> (дата обращения: 12.01.2018)
- Simas M., Pacca S.* Socio-economic benefits of wind power in Brazil // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2013. V. 1. P. 27–40.
- The Wind Power Brazil Wind Farms. 2016. URL: http://www.thewindpower.net/country_windfarms_en_26_brazil.php (дата обращения: 12.01.2018).
- Van Wijk A.J.M.* Wind Power Potential in the OECD Countries. Utrecht: Utrecht University, 1993. 35 p.
- Watt R.* Wind Turbine Noise Concerns. 2006. URL: <http://retirees.uwaterloo.ca/~rwwatt/wind.html> (дата обращения: 12.01.2018)

Поступила в редакцию 18.10.2018
 После доработки 19.02.2019
 Принята к публикации 21.02.2019

S.P. Koshkin¹

**THE ASSESSMENT OF WIND POWER
 DEVELOPMENT POTENTIAL AT THE REGIONAL LEVEL
 (CASE STUDY OF THE RIO GRANDE DO NORTE STATE, BRAZIL)**

The article deals with the assessment of wind power development potential at the regional level. Such assessment makes it possible to define a strategy of wind power development for administrative units of a country. The study is of current importance for Brazil and the Rio Grande do Norte state, in particular, in view of the active development of the industry and the long-term prospects of the governmental support. Different factors influencing the potential of industry development, including wind power potential, land use, accessibility of power lines etc., were analyzed. It has been established that the current state of wind energy development in the region cannot be considered optimal.

Key words: wind power potential, wind power resources, wind power projects, strategy of development, Brazil

REFERENCES

- Associação Brasileira de Energia Eólica Boletim de Dados, Abril 2016. 2016. URL: <http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Abril-2016-Publico.pdf>. (Accessed 12.01.2018)
- AWS Truepower Wind Resource Map of Brazil. 2012. URL: <https://www.awstruepower.com/knowledge-center/maps/>. (Accessed 12.01.2018)
- Beryozkin M.Yu., Sinyugin O.A., Solovyov A.A.* Geografiya innovatsij v sfere traditsionnoj i vozobnovlyaevoj energetiki mira [Geography of innovations in global conventional and renewable energy] // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 5. Geography. 2013. V. 1. P. 28–32. (In Russian)
- CAT Where should I put a wind turbine? // Centre for Alternative Technology, 2017 г. URL: <http://info.cat.org.uk/questions/wind/where-should-i-put-wind-turbine/> (Accessed 12.01.2018)
- COSERN Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte. 2003. URL: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfs0cAH/atlas-eolico-rn?part=7> (Accessed 12.01.2018)
- Gismeteo Дневник погоды. 2017. URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/> (Accessed 12.01.2018)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory for Renewable Energy Sources, engineer; e-mail: spkoshkin@gmail.com

Hoogwijk M.M. On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources // Utrecht University, 2004. URL: <http://np-net.pbworks.com/f/Hoogwijk+%282004%29+Global+and+regional+potential+of+renewable+energy+sources+%28Thesis+Utrecht%29.pdf> (Accessed 12.01.2018)

IDEMA Tipos de vegetação encontrados nas diferentes áreas geográficas do Rio Grande do Norte // Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte, 2002. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-566X2007000100016 (Accessed 12.01.2018)

Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and Climatology]. Moscow: Moscow University Press, 2013. 584 p. (In Russian)

Lukashova E.N. Yuzhnaya Amerika. Fizicheskaya geografiya [South America. Physical Geography]. Moscow: Uchpedgiz, 1958. 464 p. (In Russian)

National Renewable Energy Laboratory Wind Resource Assessment Handbook. 1997. URL: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/22223.pdf> (Accessed 12.01.2018)

Simas M., Pacca S. Socio-economic benefits of wind power in Brazil // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2013. V. 1. P. 27–40.

The Wind Power Brazil Wind Farms. 2016. URL: http://www.thewindpower.net/country_windfarms_en_26_brazil.php (Accessed 12.01.2018)

van Wijk A.J.M. Wind Power Potential in the OECD Countries. Utrecht: Utrecht University, 1993. 35 p.

Watt R. Wind Turbine Noise Concerns. 2006. URL: <http://retirees.uwaterloo.ca/~rwwatt/wind.html> (Accessed 12.01.2018)

Received 18.10.2018

Revised 19.02.2019

Accepted 21.02.2019