

## ОЦЕНКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Приведены основные характеристики скорости ветра и оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области. Для исследования ветрового режима были использованы данные метеорологических ежемесячников за период с 1966 по 2011 г. по 21 метеорологической станции Кемеровской области. Результаты оценки ветроэнергетического потенциала имеют практическое применение при проектировании и использовании систем энергоснабжения, использующих возобновляемые ресурсы. Ветроэнергетические ресурсы могут использоваться и в перспективном планировании экономического развития данной территории.

**Ключевые слова:** ветровой режим; ветроэнергетический потенциал; сезонный ход.

Для обеспечения человечества энергией в подавляющем большинстве используются источники на основе различных видов ископаемого топлива. Массовое использование полезных ископаемых в качестве топлива привело к загрязнению окружающей среды до критических значений, к угрозе истощения запасов полезных ископаемых. Для решения этих глобальных проблем ведется поиск альтернативных источников энергии. В этом качестве рассматриваются и атомная энергетика, и так называемые чистые источники энергии, в число которых входят установки, использующие энергию ветра. Использование атомной энергетика, несмотря на ряд преимуществ, встречает все больше возражений в связи с огромной опасностью и проблемой утилизации радиоактивных отходов. Показательные примеры – аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима». Энергия ветра хотя и используется с глубокой древности, имеет ряд крупных недостатков, в первую очередь низкую единичную плотность этой энергии, зависимость от погодных условий, несовершенство её преобразования в более удобные виды энергии. Это до сих пор ограничивает широкое использование данного природного источника. В настоящее время появилось много различных установок для преобразования энергии ветра в другие виды энергии, в том числе и в наиболее удобную – электрическую. Эти установки называют аэрогенераторами или ветроэнергетическими установками (ВЭУ), они находят применение в самых различных местах: могут использоваться в индивидуальной жилой застройке, в фермерских хозяйствах и т.п.

Для решения задач об оценке ветроэнергетического потенциала и возможного вклада его в ресурсосбережение и экологию региона необходимо иметь представление об особенностях распределения характеристик ветрового режима во времени и по территории. Ветер – один из наиболее изменчивых метеорологических элементов. Скорость ветра и направление значительно изменяются, если на его траектории встречаются какие-либо препятствия (обусловленные рельефом местности, растительностью, наличием водных объектов и искусственных сооружений). Влияние этих факторов характеризуют параметром шероховатости подстилающей поверхности. Изменения касаются не только ветра у поверхности земли, но и на высотах. Следовательно, информация о ветре в каких-то точках, полученную по данным метеостанций, следует использовать с учетом однородности рассматриваемой территории. Если местоположение точек не отличается от местоположения соответствующих метеорологических станций, то дан-

ные метеостанций можно распространять на расстояния до 50 километров и даже более. Даже в условиях равнинной открытой местности две близкие друг к другу станции могут различаться по ветровым показателям в зависимости от защищенности флюгера деревьями или зданиями, построенными в защитной зоне метеостанции. Со временем условия местоположения станций по разным причинам могут сильно меняться. В связи с этим при анализе данных о ветре необходимо уделять внимание описаниям местоположения станций, оценке степени защищенности флюгера.

Для оценки ветрового режима и ветроэнергетического потенциала ветра Кемеровской области использованы данные 21 гидрометеорологической станции за период с 1966 по 2011 г. В табл. 1 приведены основные статистические характеристики среднегодовой скорости ветра по станциям Кемеровской области.

Анализ полученных данных показывает, что среднегодовые многолетние скорости ветра на станциях Кемеровской области меняются в достаточно широких пределах – от минимальной – 0,8 м/с (Усть-Кабырза) до максимальной – 3,6 м/с (Новокузнецк, Юрга). Коэффициент вариации  $C_v$ , характеризующий временную изменчивость скоростей ветра относительно средней, меняется в пределах от 0,25 (ст. Белово) до 0,44 (ст. Кондома). Коэффициент вариации используется для характеристики однородности исследуемой совокупности. Статистическая совокупность считается количественно однородной, если коэффициент вариации не превышает 0,33.

Для интерполяции скоростей ветра и построения карты-схемы использовались программа ArcGis10 и ее модуль Geostatistical Analyst, который позволяет также оценить стандартную ошибку интерполяции. На рис. 1 показана карта-схема распределения среднегодовой скорости ветра по территории Кемеровской области с использованием ординарного кригинга. На рис. 2 приведена карта распределения стандартной ошибки интерполяции для среднегодовой скорости ветра по территории области. На большей части рассматриваемой территории ошибка интерполяции не превышает 0,3–0,6 м/с.

При исследовании характеристик ветра также необходимо учитывать их годовой ход. Ввиду наличия годового хода скорости ветра ветроэнергетические ресурсы могут значительно меняться в течение года. На рис. 3, для примера, в графическом виде представлены среднемесячные характеристики скорости ветра для трех станций: Киселевск, Новокузнецк и Междуреченск.

Таблица 1

Основные статистические характеристики среднегодовой скорости ветра на станциях Кемеровской области (1966–2011 гг.)

Станция	$V_{с}$ , м/с	$Cv$	$\sigma$	Станция	$V_{с}$ , м/с	$Cv$	$\sigma$
Яя	3,1	0,38	1,2	Промышленная	2,6	0,41	1,1
Тайга	3,3	0,27	0,9	Красное	2,2	0,37	0,8
Мариинск	3,1	0,40	1,2	Белово	2,8	0,25	0,7
Тяжин	3,2	0,34	1,1	Киселевск	2,8	0,31	0,9
Тисуль	3,3	0,36	1,2	Новокузнецк	3,6	0,28	1,0
Юрга	3,6	0,36	1,3	Междуреченск	1,3	0,36	0,5
Барзас	2,8	0,37	1,0	Кузедеево	1,9	0,35	0,7
Топки	3,0	0,32	1,0	Кондома	0,9	0,44	0,4
Кемерово	2,7	0,32	0,9	Таштагол	1,3	0,36	0,5
Центральный Рудник	3,0	0,32	0,9	Усть-Кабырза	0,8	0,45	0,4
Крапивино	2,1	0,35	0,8				

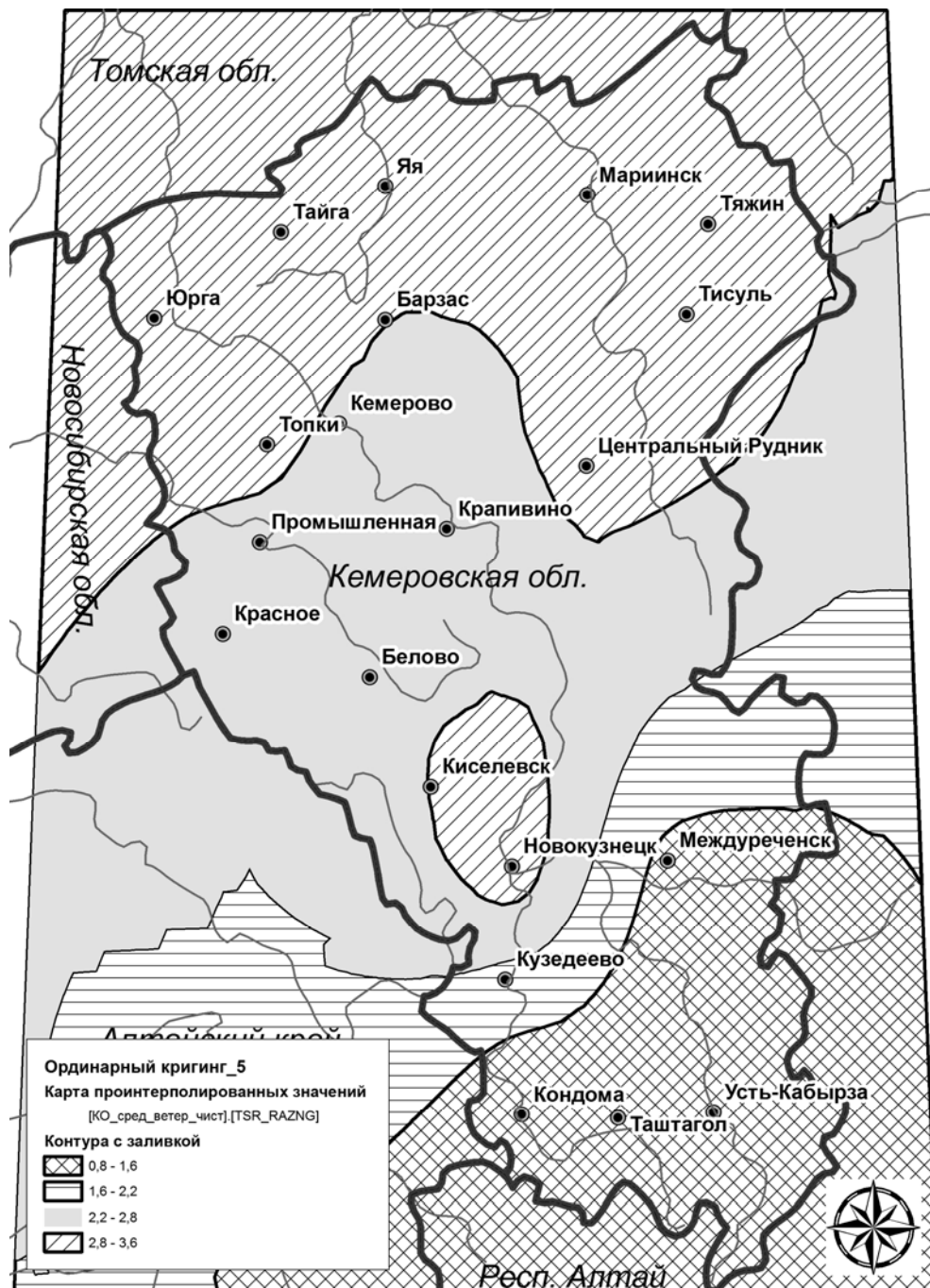


Рис. 1. Распределение среднегодовых скоростей ветра на территории Кемеровской области

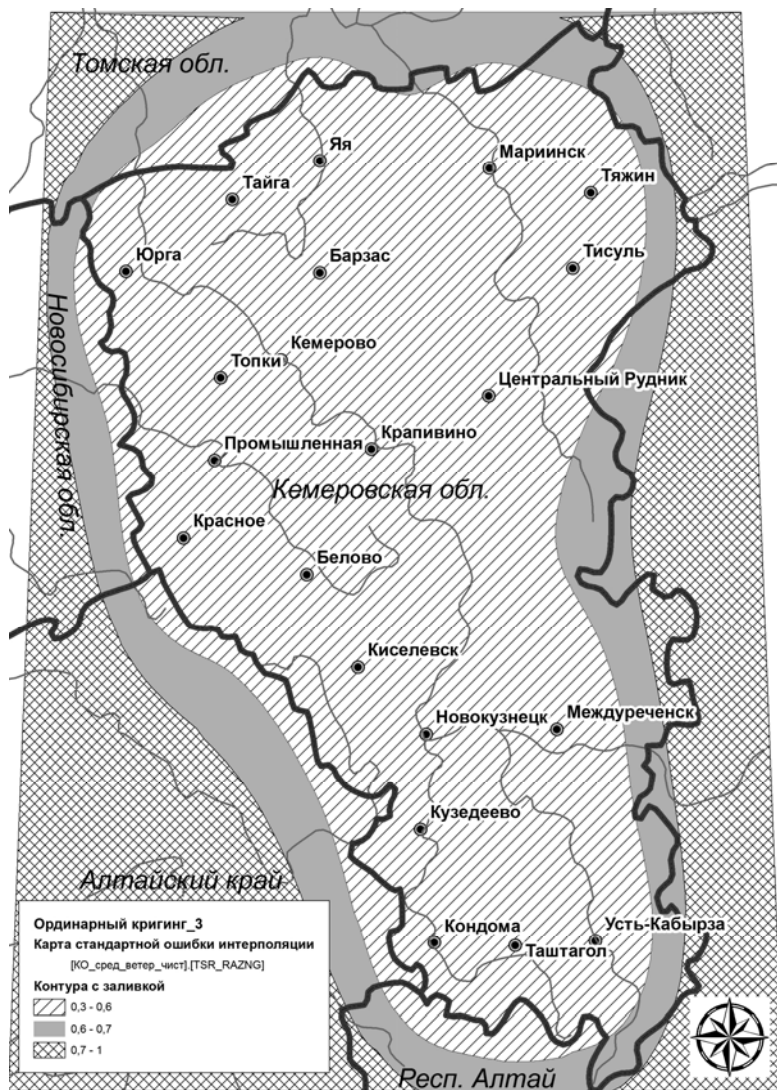


Рис. 2. Распределение стандартной ошибки интерполяции скоростей ветра на территории Кемеровской области

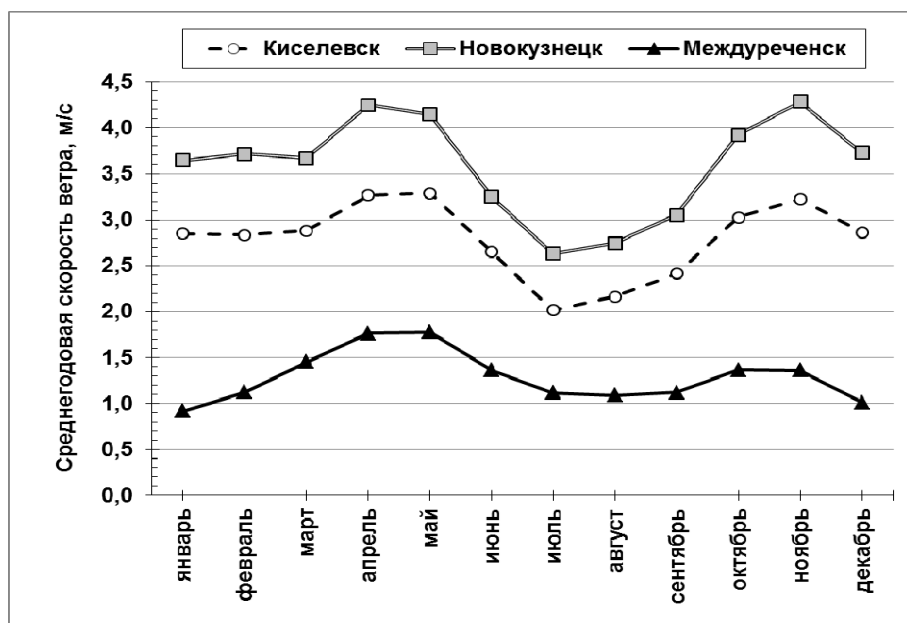


Рис. 3. Сезонный ход скорости ветра (станции Киселевск, Новокузнецк, Междуреченск)

В сезонном ходе скоростей ветра практически на всех метеостанциях прослеживаются два максимума (в апреле – мае и октябре – ноябре) и два минимума (в январе и июле – августе).

Для исследования динамики среднегодовой скорости ветра были построены графики для всех рассматриваемых станций. На рис. 4, для примера, представлена динамика среднегодовой скорости ветра для некоторых станций Кемеровской области (Киселевск, Новокузнецк, Междуреченск).

Анализ динамики изменения скоростей ветра показал, что практически на всех станциях Кемеровской области также имеется тенденция к снижению скоростей ветра. Для выявления тенденций изменения скорости ветра исходный ряд был разбит на две части: первая часть – период с 1966 по 1990 г. (П1), вторая – с 1991 по 2011 г. (П2). Для каждой части вычислялось среднее значение скорости ветра. В табл. 2 приведены значения среднегодовых скоростей ветра по периодам и отношение первого периода ко второму (П1/П2).

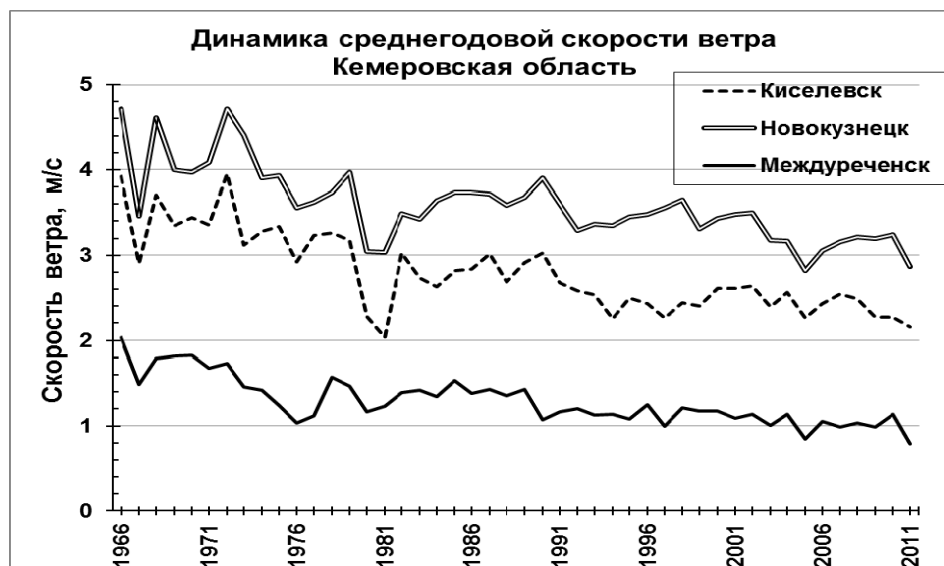


Рис. 4. Динамика среднегодовой скорости ветра (станции Киселевск, Новокузнецк, Междуреченск)

Таблица 2

Значения среднегодовой скорости ветра на станциях Кемеровской области по периодам

Станция	Периоды			Отношение П1/П2
	(1966–1990 гг.) П1	(1991–2011 гг.) П2	(1966–2011 гг.) П1+П2	
Яя	3,4	2,8	3,1	1,2
Тайга	3,5	3	3,3	1,2
Мариинск	3,7	2,5	3,1	1,5
Тяжин	3,6	2,7	3,2	1,3
Тисуль	3,8	2,8	3,3	1,4
Юрга	4,4	2,6	3,6	1,7
Барзас	3	2,4	2,8	1,3
Топки	3,6	2,4	3	1,5
Кемерово, АГРО	3	2,3	2,7	1,3
Центральный Рудник	3,2	2,7	3	1,2
Крапивоно	2,5	1,7	2,1	1,5
Промышленная	3,1	2,1	2,6	1,5
Красное	2,4	1,9	2,2	1,3
Белово	2,9	2,6	2,8	1,1
Киселевск	3,1	2,4	2,8	1,3
Новокузнецк	3,8	3,3	3,6	1,2
Междуреченск	1,5	1,1	1,3	1,4
Кузедеево	2	1,8	1,9	1,1
Кондома	0,9	1	0,9	0,9
Таштагол	1,4	1,2	1,3	1,2
Усть-Кабырза	0,8	0,8	0,8	1,0

Практически на всех станциях средняя скорость в первом периоде была выше, чем во втором. Изменение составило от 1,1 раза (Кузедеево) до 1,7 (Юрга). Исключение составили две станции: станция Усть-Кабырза, скорость двух периодов равна, и станция

Кондома, здесь зафиксировано повышение скорости ветра во втором периоде в 1,1 раза по отношению к первому периоду. Выявление причин таких тенденций требует более подробных исследований. Такая тенденция к уменьшению среднегодовых скоростей ветра от-

мечается и в других регионах России. Возможные причины такого уменьшения скорости ветра делят на несколько групп. К первой группе (наиболее значимой) относят увеличение защищенности метеорологических площадок вследствие роста деревьев и застройки окружающей территории. Ко второй группе причин относят изменение режима общей циркуляции атмосферы (хотя этот факт в некоторых работах опровергается). Так, например, в статье [1] показано, что при изучении среднегодовой скорости ветра на изобарических поверхностях 850, 500 и 359 гПа для станций, расположенных на севере России, ни на одной аэрологической станции скорость ветра на высотах не уменьшилась. Еще одна предполагаемая причина уменьшения скорости ветра – это тенденция к падению атмосферного давления. Для Западной Сибири эти тенденции выявлены в работе [2].

Для оценки энергии ветрового потока используют различные зависимости. Энергия ( $E$ ), содержащаяся в потоке движущегося воздуха, определяется следующим соотношением [1, 2]:

$$E = 4,81 \times 10^{-4} \times V^3 \times D^2 \times \xi \times \eta, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость ветра;  $D$  – диаметр ветроколеса ВЭУ;  $\xi$  – номинальный коэффициент использования ветра;  $\eta$  – к.п.д. преобразования механической энергии в электрическую.

Многочисленными исследованиями доказано, что практическая эффективность системы винт – генератор достигает примерно 30–40%. Авторами [3] для расчета средней удельной мощности ветрового потока (ветроэнергетического потенциала на  $1 \text{ м}^2$ )  $N_c$  использовалась формула, учитывающая среднюю скорость ветра  $V_c$  и её коэффициент вариации  $C_v$ :

$$N_c \approx 0,613 \times V_c^3 \times (1 + 3C_v^2 - 0,9C_v^3 + 2,9C_v^4) \quad (2)$$

Эта формула определяет теоретическую (потенциальную) величину ветровой энергии и является верхним пределом запасов ветровых ресурсов, так как не учитывает потери преобразования. Ветроэнергетические ресурсы на практике и в теории подразделяются на два вида: потенциальные и технические. Потенциальные ветроэнергоресурсы – это суммарная энергия движения воздушных масс, перемещающихся над рассматриваемой территорией. В природе эти ресурсы необычайно велики. Однако на практике используется лишь некоторая часть потенциальных энергоресурсов. Эта энергоактивная (утилизируемая) часть энергии ветра называется техническими ветроэнергоресурсами. Их величина зависит от характеристик конкретных технических устройств. Согласно работе [4], вырабатываемая ВЭУ мощность зависит следующих факторов: куба скорости ветра; плотности и турбулентности воздуха; квадрата диаметра ротора (площади вращения воздушного колеса); эффективности винта и генератора; стартовой и номинальной скорости ветра (при которых аэрогенератор начинает работать и развивает номинальную мощность); номинальной мощности ВЭУ.

Первые два фактора зависят от выбора района установки ВЭУ, удельная выработка ветровой электроэнергии полностью зависит от силы ветра и продолжительности энергоактивных скоростей на данной территории. Остальные факторы являются функциями аэроге-

нераторов. Также следует иметь в виду, что получение энергии достигается лишь при скорости ветра, находящейся в допустимом рабочем диапазоне для каждого ветроагрегата. Часто скорость ветра бывает слишком низкой, и ветроагрегат не может работать, либо достигает такого большого значения, что необходимо принимать меры к его отключению с целью предотвращения разрушения.

При современном уровне развития ВЭУ условия их экономической оправданной эксплуатации в зависимости от среднегодовой скорости ( $V_c$ ) можно приближенно оценить следующим образом [5]: при скорости  $V_c < 3 \text{ м/с}$  – бесперспективные для любых ВЭУ; при скорости  $3 \leq V_c < 3,5 \text{ м/с}$  – малоперспективные; при  $3,5 \leq V_c < 4 \text{ м/с}$  – перспективные для ВЭУ малой мощности; при  $4 \leq V_c < 5,5 \text{ м/с}$  – перспективные для малой и большой мощности и при  $V_c \geq 5,5 \text{ м/с}$  – перспективные для всех ВЭУ. На рис. 5 показано распределение скорости ветра по приведенной классификации и выделены районы по перспективности размещения ветроэнергетических установок в Кемеровской области.

Большая часть области относится к бесперспективным районам для размещения ВЭУ любой мощности (среднегодовая скорость ветра меньше  $3 \text{ м/с}$ ). В северной части области выделяется район с малоперспективными условиями (среднегодовая скорость  $3,0$ – $3,5 \text{ м/с}$ ). Следует отметить, что эта классификация в настоящее время не совсем точно отражает перспективы использования энергии ветра, так как в последние годы появилось много ВЭУ, работающих и при малых скоростях ветра.

Для расчета удельной мощности по кубу средней скорости ветра можно использовать следующую формулу:

$$N_{cp} = 1,16 \times (V_{cp})^3, \quad (3)$$

где  $N_{cp}$  – мощность, рассчитанная по средним значениям скорости ветра,  $\text{Вт/м}^2 \times \text{с}$ ;  $V_{cp}$  – средняя скорость ветра,  $\text{м/с}$  [6].

Для более точных расчетов, согласно [9], используется формула

$$N_{град} = 0,613 \times (V_{град})^3 \times f(V_{град}) / 100, \quad (4)$$

где  $N_{град}$  – теоретическая удельная мощность, рассчитанная по градациям,  $\text{Вт/м}^2 \times \text{с}$ ;  $V_{град}$  – скорость ветра (средняя граница градации),  $\text{м/с}$ ;  $f(V_{град})$  – дифференциальная повторяемость скорости ветра данной градации, %.

Для оценки удельной мощности ветроэнергетических ресурсов Кемеровской области за весь рассматриваемый период была использована формула (3). Результаты расчетов по данным метеостанций показали, что величина удельной мощности меняется в значительных пределах. В Кемеровской области минимальное среднее значение удельной мощности наблюдалось на станции Усть-Кабырза –  $1,0 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$ , максимумы среднегодовой удельной мощности зафиксированы на станции Юрга –  $76,0 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$ , на ст. Новокузнецк –  $67,7 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$ , на ст. Тисуль –  $61,1 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$ . Наблюдаемые в отдельные месяцы значения удельной мощности достигали значений:  $687,5 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$  на станции Новокузнецк, на станции Мариинск –  $737,0 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$ , на станции Тисуль –  $616,0 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$  и  $963,5 \text{ Вт/м}^2 \times \text{с}$  на станции Яя. При таких значениях удельной мощности можно получить значительное количество электроэнергии.

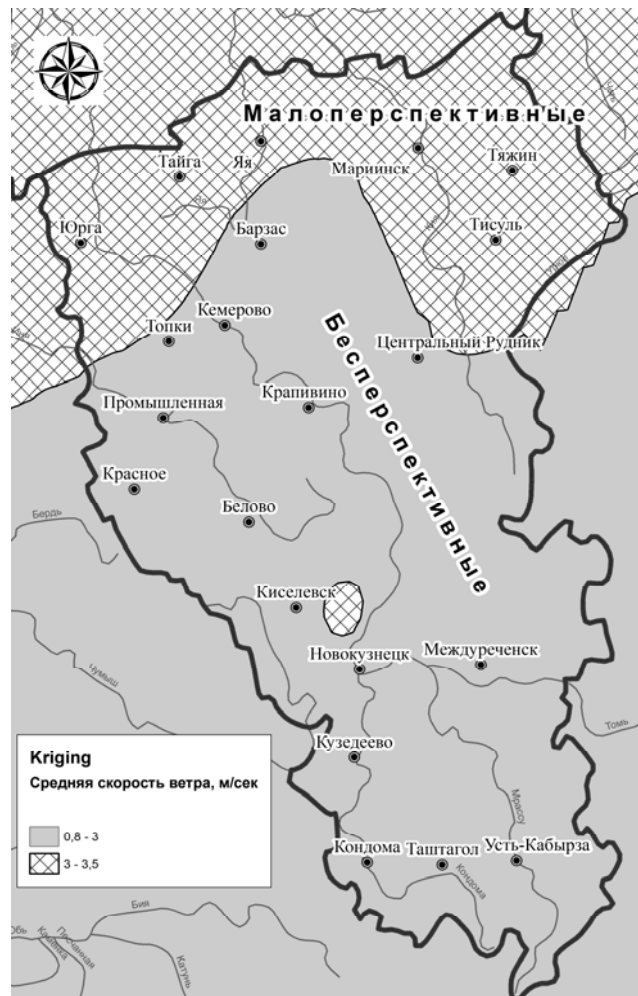


Рис. 5. Районирование Кемеровской области по перспективности размещения ВЭУ по классификации [5]

Таблица 3

Удельная мощность ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{с}$ ) ветрового потока по станциям юго-востока Западной Сибири, рассчитанная по формулам (3) и (4) за период с 2000 по 2011 г.

Станция	Удельная мощность, $\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{с}$		Станция	Удельная мощность, $\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{с}$	
	формула 3	формула 4		формула 3	формула 4
Яя	30,2	46,9	Промышленная	11,9	19,0
Тайга	36,7	48,4	Красное	8,8	19,0
Мариинск	19,4	40,6	Белово	19,3	24,0
Тяжин	21,6	31,4	Киселевск	19,2	29,4
Тисуль	30,1	55,4	Новокузнецк	43,5	73,8
Юрга	19,6	45,0	Междуреченск	1,8	10,0
Барзас	17,5	50,4	Куздеево	9,6	23,8
Топки	14,9	21,4	Кондома	1,1	5,3
Кемерово, агро	12,5	18,1	Таштагол	1,9	11,5
Центр. Рудник	26,8	41,1	Усть-Кабырза	1,2	5,4
Крапивино	6,8	12,2			

Учитывая значительное снижение скоростей ветра за рассматриваемый период, для более точной оценки ветроэнергетического потенциала в современный период, была рассчитана удельная мощность скорости ветра за период с 2000 по 2011 г.

Для расчетов была использована формула (3). Для сравнения была дополнительно использована формула (4), учитывающая данные по повторяемости скоростей ветра по градациям [7]. Результаты приведены в табл. 3. Сравнение данных расчета за весь период (1966–2011 гг.) и периода с 2000 по 2011 г. показывает, что среднегодовые значения удельной мощности

за весь период по станциям значительно превышают значения за последние годы, уменьшение на некоторых станциях достигает 3–5 раз.

Сравнение расчетов по формулам (3) и (4) показывает, что величина удельной мощности, рассчитанная по формуле (4), на всех станциях превышает значения, полученные по формуле (3). Разница значений для Кемеровской области может достигать 83%.

Таким образом, рассмотрев основные характеристики ветра на высоте расположения флюгера (10–14 м) по станциям Кемеровской области, можно сделать следующие выводы:

– оценка ветроэнергетических ресурсов по данным метеостанций показывает, что использование ВЭУ малой мощности возможно в переходные периоды – апрель, май, октябрь, ноябрь, когда отмечаются более высокие скорости ветра;

– использование (ВЭУ) средней и большой мощности по классификации [5] бесперспективно;

– учитывая нестабильность (суточная, сезонная, погодная) поступления ветровой энергии, её можно использовать лишь в качестве дополнительного источника электроснабжения.

Для более эффективного использования ветровой энергии необходимо располагать ветровые приемники ВЭУ на больших высотах: 30÷100 м и выше, так как

скорость ветра с высотой увеличивается по логарифмическому закону. Расчет показывает, что скорость ветра на высоте 30 м выше в среднем в 1,7 раза, на высоте 100 м – в 2,4 раза. При этом среднегодовые скорости воздушных потоков на стометровой высоте превышают 7 м/с. Установка ВЭУ на высоте 100 м (используя подходящую естественную или искусственную возвышенность) практически в любом районе может обеспечить эффективную работу ВЭУ и значительные дополнительные поступления электроэнергии.

Кроме этого, дополнительные возможности может принести использование ВЭУ, работающих при малых скоростях ветра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 3. С. 83–97.
2. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И. Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 90–96.
3. Тажиев И.Т. Энергия ветра – база электрификации сельского хозяйства. Л. : Гос. энерг. изд-во, 1952. 192 с.
4. Исаев А.А. Прикладная климатология. М. : Изд-во МГУ, 1989. 88 с.
5. Дробышев А.Д., Пермяков Ю.А. Ветровая энергия и её возможный вклад в ресурсосбережение и экологию Прикамья : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 1997. 112 с.
6. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / под ред. Н.В. Кобышевой и К.Ш. Хайруллина. СПб. : Гидрометеиздат, 2005. 320 с.
7. Руководящий документ. Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок (РД 52.04.275-89). Л. : Гидрометеиздат, 1991. 55 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 26 августа 2013 г.