

Министерство образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.В. ЕЛИСТРАТОВ
М.В. КУЗНЕЦОВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
НЕТРАДИЦИОННОЙ И ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ**

Часть 1

**Определение ветроэнергетических ресурсов
региона**

Методические указания

Санкт-Петербург
Издательство СПбГУ
2003

УДК 620.92+621.311.24

Елистратов В.В., Кузнецов М.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч. 1. Определение ветроэнергетических ресурсов региона. Методические указания. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003 г.

Методические указания соответствуют программе дисциплины «Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики» специальности 100900 «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии».

Указания в сжатой форме знакомят студентов с современным состоянием ветроэнергетики, общей оценкой ветрового режима и ветроэнергетических ресурсов на территории РФ.

Даются основные понятия, определения и терминология, используемые в практике ветроэнергетических расчетов по определению ветроэнергетических ресурсов.

Основной задачей пособия является практическая помощь студентам в выполнении и оформлении индивидуальной курсовой работы по определению ветроэнергетических ресурсов конкретного региона РФ.

Пособие составлено на основе анализа существующих методик определения ветроэнергетического потенциала. Студентам рекомендована обобщенная, наиболее рациональная методика, позволяющая определить ресурсы ветроэнергетики для любых регионов России и сделать проектное предложение по первоочередной ВЭС в регионе.

Указания предназначены также для студентов инженерно-строительного, электромеханического и факультета экономики и менеджмента, изучающих курсы, связанные с использованием в энергетике нетрадиционных и возобновляемых источников.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Санкт-Петербургский государственный
Политехнический университет, 2003

ВВЕДЕНИЕ

История развития ветроэнергетики насчитывает многие века, начиная с использования паруса и ветряных мельниц. Однако лишь в 20 веке началось крупномасштабное внедрение ветровых турбин, достигшее к концу века мощности несколько миллионов киловатт. За последние 10-20 лет в результате принятых политических решений и значительных капитальных вложений в НИОКР и организацию производства рядом стран (Дания, США, Германия, Голландия, Великобритания и др.) создана отрасль ветроэнергетики, которая обеспечивает выработку электроэнергии при себестоимости 4-5 центов/кВт-ч. Разработана широкая номенклатура ветроагрегатов с хорошими технико-экономическими показателями. Единичная мощность сетевых ветроагрегатов в последние 20 лет непрерывно возрастала и сейчас составляет 800-2000 кВт. Преобладающей технологией освоения ветровых ресурсов является создание ветропарков. Ведущими странами в этом являются США, Германия, Дания, Индия, Голландия, Англия и др.

В настоящее время общая установленная мощность ветроэнергетических парков, работающих в энергосистеме составляет свыше 15 тысяч МВт, что примерно в 2 раза превышает оптимистические прогнозы начала 90-х годов.

Ветроэнергетика сегодня обеспечивает около 8 миллионов домов электрической энергией, а также решает проблемы водоснабжения и ирригации во многих странах мира. Одним из приоритетных направлений развития ветроэнергетики должно явиться широкое внедрение в системы автономного энергоснабжения (во многих странах от 40 до 70% населения проживает в зонах автономного и децентрализованного энергоснабжения) и разработка более экономичных ветроагрегатов на основе новых технологий преобразования механической и электрической энергии.

Важнейшей составляющей развития любой отрасли энергетики является определение ее ресурсного потенциала, выявления наиболее эффективных "месторождений", определение возможных объемов использования данного источника энергии. Применительно к ветроэнергетике это особенно актуально, так как это ресурс, имеющий значительную вероятностную составляющую

прихода энергии. Поэтому в предлагаемых методических указаниях уделено основное внимание определению ветроэнергетических ресурсов (потенциала) как на общей территории региона, так и для конкретного места установки ветроэнергетического агрегата или ветроэлектрической станции.

1. СОВРЕМЕННАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

1.1. Современные ветроэнергетические установки и ветроэлектрические станции.

Использование энергии ветра на практике осуществляется с помощью ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ВЭУ), в которых кинетическая энергия ветрового потока преобразуется в механическую энергию вращения ветроколеса, а затем в электрическую энергию генератора. В основном используются традиционные ВЭУ башенного типа с горизонтальной осью вращения ветроколеса. В настоящее время единичная мощность крупных промышленных ВЭУ достигает до 2÷4 МВт, высота башни которых 60÷100 м, а диаметр ветроколеса 60÷80 м. ВЭУ малой мощности для индивидуальных потребителей и небольших хозяйственных объектов в настоящее время используются во всех странах, мощность этих ВЭУ составляет от 0,1 кВт до 100 кВт.

Для энергетических целей наиболее распространены ВЭУ с единичной мощностью от 100 кВт до 2000 кВт. На рис.1а в качестве примера показана горизонтальноосевая ВЭУ датской фирмы «MICON» и ее характеристика отдачи мощности от скорости ветра.

Основные параметры ВЭУ:

установленная (номинальная) мощность – $N_{ВЭУ}=400$ кВт;

диаметр ветроколеса – $D=31$ м;

высота башни – $H=36$ м.

На характеристике ВЭУ (рис.1б) указаны следующие характерные значения скорости ветра:

$u_0=4$ м/с – минимальная скорость ветра, при которой ВЭУ начинает отдавать мощность;

$u_p=15$ м/с – расчетная скорость ветра, при которой мощность ВЭУ достигает значения, равного ее установленной мощности;

$u_{\max}=25$ м/с – максимальная скорость ветра, выше которой ВЭУ автоматически останавливается из соображений ее надежной работы и срока службы.



Рис. 1а. Ветроэнергетическая установка MICON-400.



Рис. 2. ВЭС на побережье Северного моря (ФРГ),

$N_{ВЭС}=12,5$ МВт (50 ВЭУ по 0,25 МВт).

Кроме того, каждая ВЭУ имеет еще одно характерное значение скорости ветра: $u_{\text{бур}}$ – буревая скорость ветра, которую надежно выдерживает конструкция ВЭУ (для остановленной и заторможенной ВЭУ типа “MICON” $u_{\text{бур}} = 69$ м/с).

Для выработки электроэнергии в промышленных масштабах проектируют и строят ветроэнергетические парки, объединяющие на больших территориях десятки и сотни ВЭУ. Эти ветровые парки являются современными ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ (ВЭС), работающими в энергосистемах.

На рис. 2 в качестве примера показана ВЭС установленной мощности 12,5 МВт, состоящая из 50 ВЭУ с единичной мощностью 250 кВт каждая. ВЭС расположена на побережье Северного моря в ФРГ.

Кроме системных ВЭС большое значение имеют автономные ВЭУ и ВЭС, эксплуатируемые в удаленных районах децентрализованного энергоснабжения, что особенно актуально для России в северных и восточных регионах.

К 2002 году общая установленная мощность ВЭУ и ВЭС в мире достигла около 30 тыс. МВт. К 2010 году прогнозируется увеличение до 150÷160 тыс. МВт.

1.2. Виды ветроэнергетических ресурсов, их общая оценка.

В соответствии с зарубежной и отечественной классификацией и терминологией различают три вида ветроэнергетических ресурсов [1-14]:

- теоретические ресурсы или ПРИРОДНЫЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ
- технические ресурсы или ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ
- экономические ресурсы – ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ.

Природные ветроэнергетические ресурсы (природный ветроэнергетический потенциал) это среднегодовое значение ветровой энергии движения воздушных масс над данной территорией. Согласно [5] он может составлять 1,5-2,5 % солнечной энергии, поступающей на Землю, которая непрерывно превращается в кинетическую энергию воздушных течений в атмосфере. Согласно этой глобальной общей оценке Россия, площадь

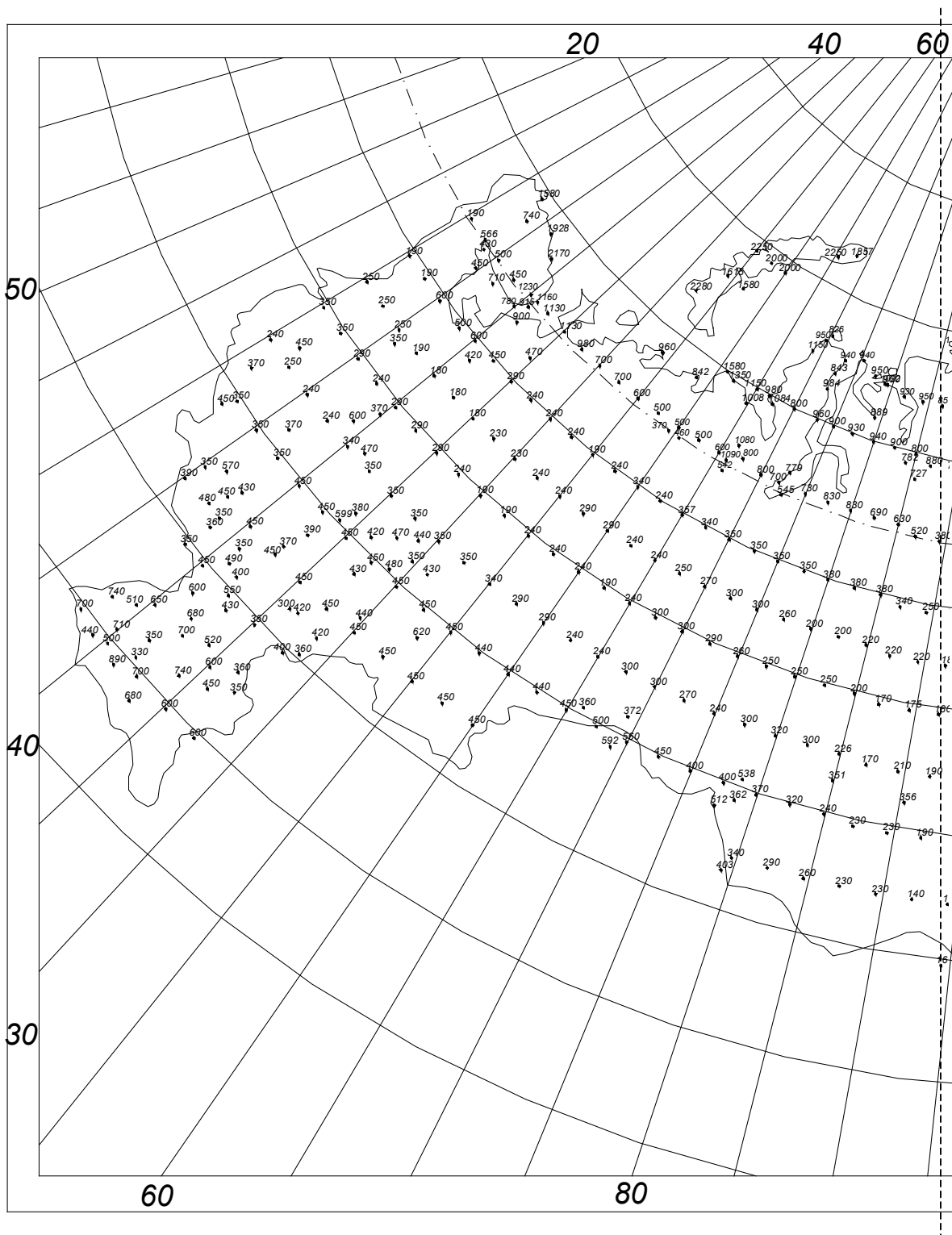


Рис. 3. Природные потенциальные ветроэнергетические ресурсы России (Вт/м²)
(левая часть)

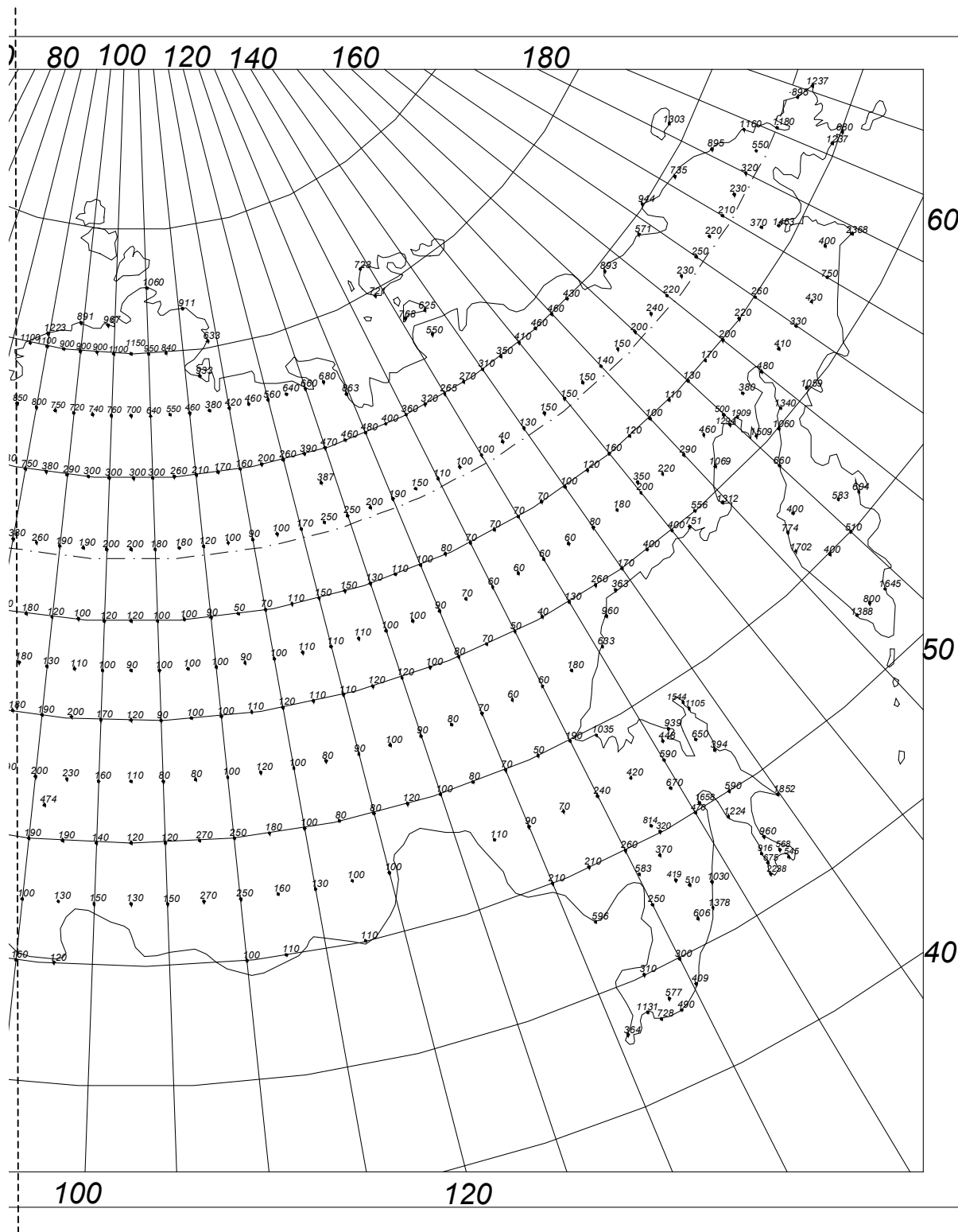


Рис. 3. Природные потенциальные ветроэнергетические ресурсы России (Вт/м^2) (правая часть)

которой составляет $17 \cdot 10^6$ км², располагает природным ветроэнергетическим потенциалом порядка $1 \cdot 10^6$ (ТВт·ч)/год.

Эту величину следует понимать как суммарную энергию движения воздушных масс, перемещающихся над территорией России.

Разработки Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова [7] для практической оценки природного ветроэнергетического потенциала в приземном слое атмосферы рекомендуют следующее его определение: среднегодовая удельная мощность ветрового потока через единицу площади, перпендикулярной направлению ветра.

В соответствии с этим определением природный ветроэнергетический потенциал N_e имеет размерность $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Распределение природного ветроэнергетического потенциала на высоте флюгера 50 м над подстилающей поверхностью по территории России показано на карте-схеме рис. 3. Наибольший потенциал на побережье морей Северного Ледовитого и Тихого океанов, где он достигает значения порядка $1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, в некоторых пунктах до $2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Наименьшие значения наблюдаются в континентальных районах, удаленных от побережий – порядка $100-200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Технический ветроэнергетический потенциал – это часть природных ветроэнергетических ресурсов, которые можно реализовать современными техническими средствами ветроэнергетики на рассматриваемой территории. Технический ветроэнергетический потенциал определяется плотностью или удельным значением годовой энергии, которую можно получить с помощью ВЭУ с 1 км² рассматриваемой территории [5, 10].

Обозначение и размерность:

$$E_{\text{техн.уд.}} \left[\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}} \right], \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}} \right].$$

На карте-схеме рис. 4 показано распределение плотности технического ветроэнергетического потенциала на территории РФ для высоты 50 м.

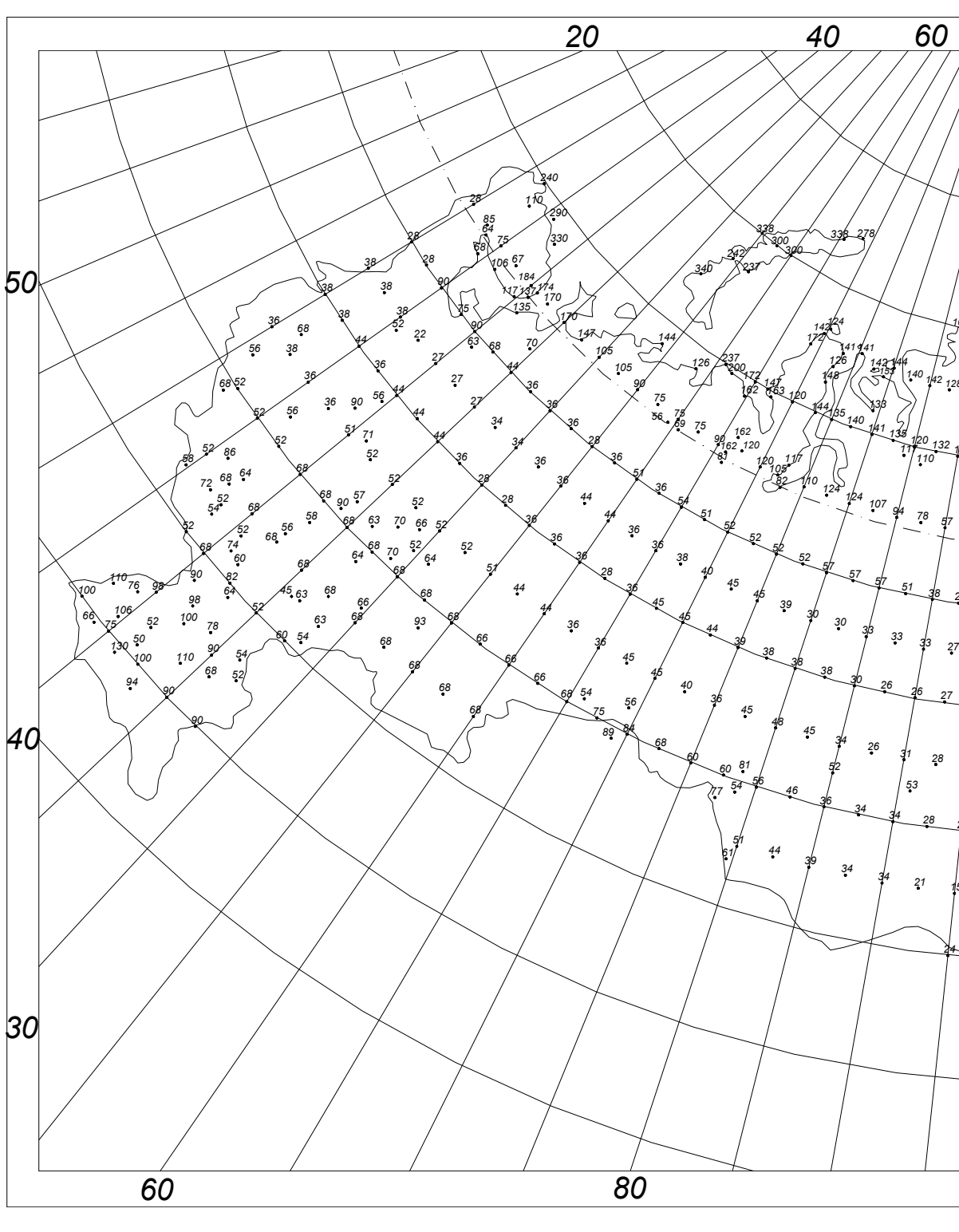


Рис. 4. Плотность технического ветроэнергетического потенциала (H=50 м)

$$\text{Э}_{\text{техн.уд.}} \cdot 10^{-1} \left[\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}} = \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}} \right] \quad (\text{левая часть})$$

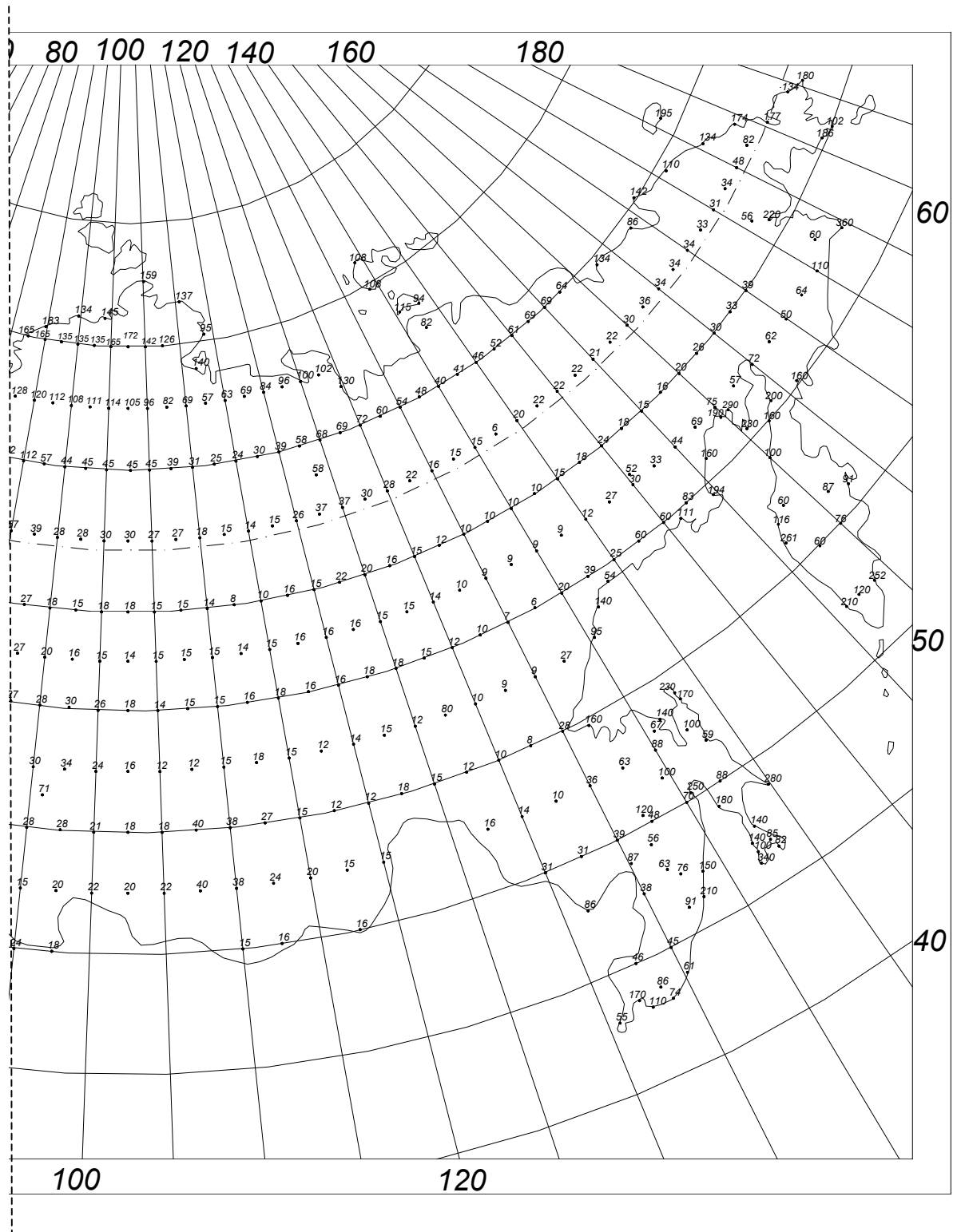


Рис. 4. Плотность технического ветроэнергетического потенциала (H=50 м)

$$\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}} \cdot 10^{-1} \left[\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}} = \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}} \right] \quad (\text{правая часть})$$

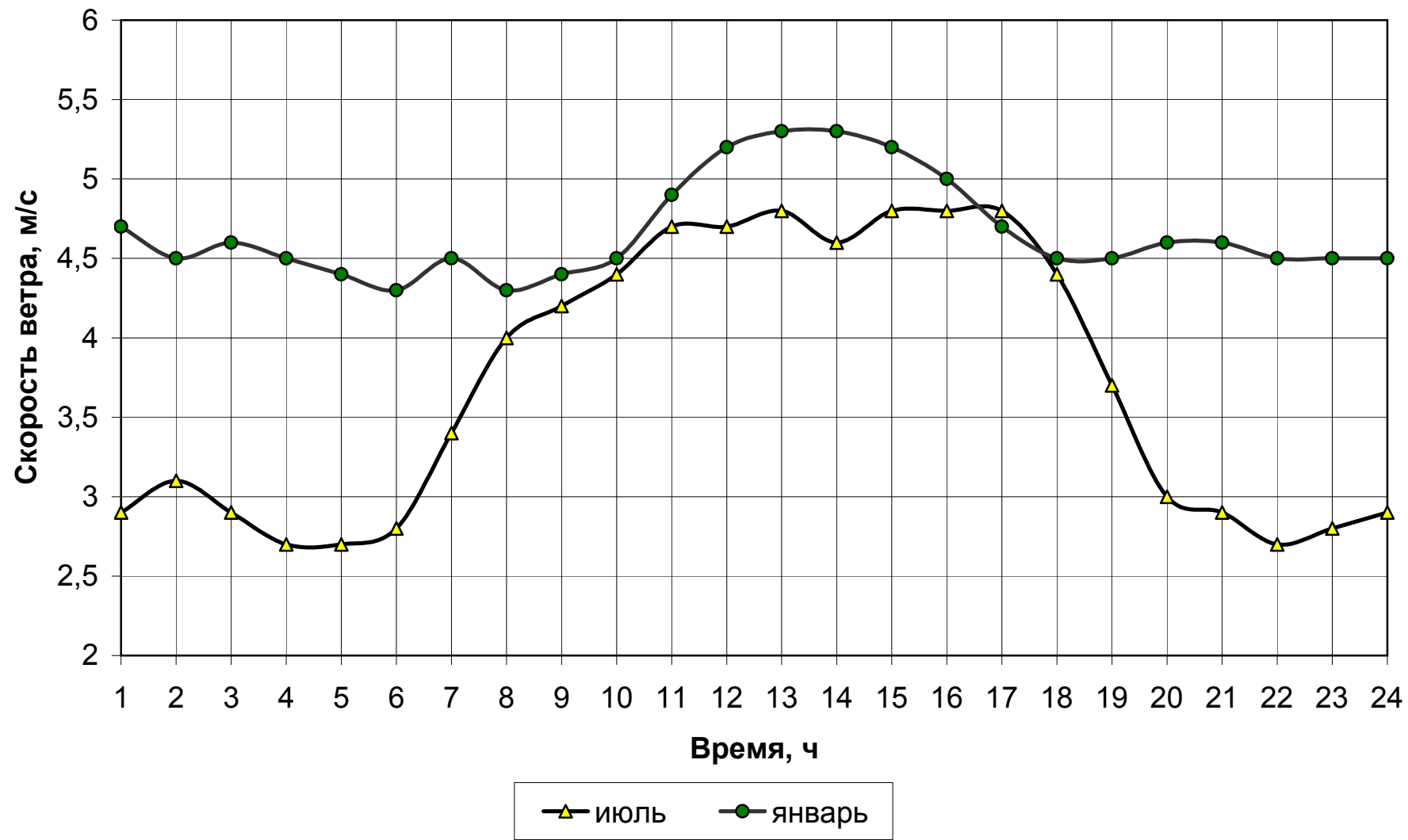


Рис. 5. Суточный ход скорости ветра в г.Хабаровске.

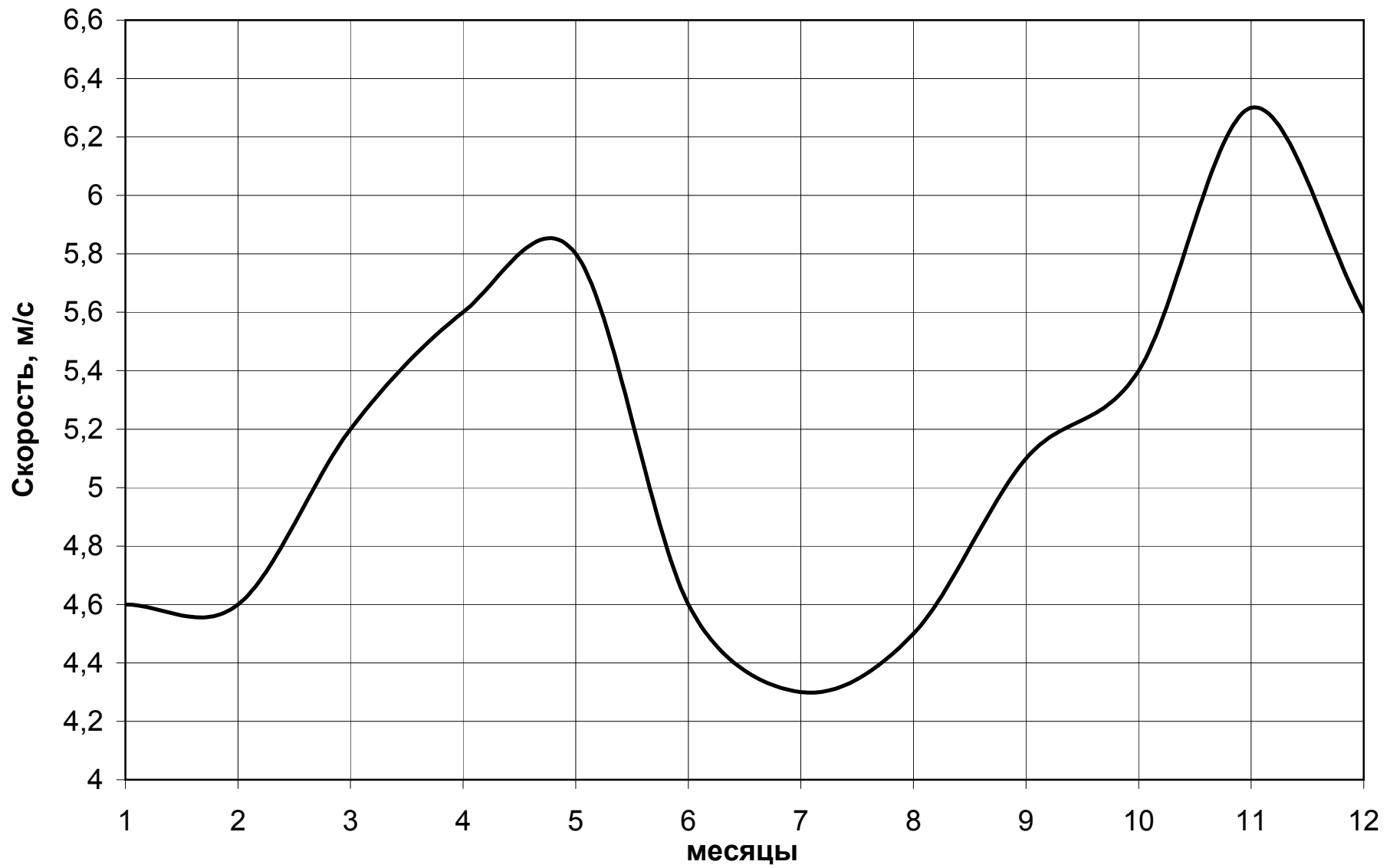


Рис. 6. Годовой ход скорости ветра, г.Хабаровск.

Его значения на побережьях океанов достигают $15 - 20 \frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2}$, а в континентальных районах составляют $1 - 2 \frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2}$.

Экономический ветроэнергетический потенциал определяется как часть технического потенциала, которую можно реализовать с экономически оправданными затратами по сравнению с традиционными энергоресурсами. Экономический потенциал можно определить по результатам разработок технико-экономического обоснования конкретного проектного предложения в рассматриваемом регионе.

Общая оценка технического и экономического ветроэнергетического потенциала России затруднительна в конкретном понимании, т.к. при общей площади территории РФ около 17 млн. км² площадь территории, предполагаемой для реального размещения ВЭУ и ВЭС, не подсчитывалась. По ориентировочным оценкам [13, 14] технический ветроэнергетический потенциал России составляет около $16,0 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, а экономический ветроэнергетический потенциал – около $8 \cdot 10^{10}$ кВт·ч/год.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРАКТИКЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

2.1. Ветроэнергетический кадастр.

Под ветроэнергетическим кадастром понимают совокупность данных ветрового режима, позволяющую проследить изменения ветра в течение суток, месяца, года, а также определить энергетические характеристики ветра (ветроэнергетический потенциал), выработку ВЭУ и ВЭС, нагрузки на конструкцию ВЭУ по максимальной скорости ветра за период не менее чем 20 лет.

Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются:

Мгновенная скорость ветра (u) – скорость в данный момент времени. Мгновенная скорость определяется за период 2 секунды (разрешающая способность метеорологических приборов) и измеряется в: [м/с], [км/час], [миль/час]. 1 миль/час=1,58 км/час=0,44 м/с.

Средняя скорость ветра:

$$u_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}, \quad (1)$$

где u_i – мгновенная скорость ветра;

n – число замеров.

Среднесуточная скорость ветра определяется по формуле (1) как среднее значение замеров мгновенных скоростей в течение суток. На рис. 5 в качестве примера показан суточный ход скорости ветра в зимний и летний периоды для Хабаровска.

На многих метеостанциях обычно ведутся 8^{ми}-срочные наблюдения (через каждые 3 часа).

Среднемесячная скорость ветра ($u_{\text{мес}}$) определяется как среднее значение среднесуточных скоростей, в течение 1 месяца.

Среднегодовая скорость ветра определяется как среднее значения среднемесячных скоростей:

$$u_{\text{год}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} u_{\text{мес}}}{12}, \quad (2)$$

Среднемесячные и среднегодовые скорости ветра определяются по многолетним наблюдениям (не менее 10 лет) и публикуются в виде таблиц в справочной и технической литературе [1,3,6,8]. Среднемесячная и среднегодовая скорости ветра по данным метеостанций Санкт-Петербурга и области приведены в таблице 1. На рис. 6 приведен график годового хода скорости ветра для Хабаровска. Следует отметить, что годовой ход скорости ветра для регионов от года к году меняется не более, чем на 15-20 % (как годовой сток рек). На рис. 7 приведены среднегодовые ($u_{\text{год}}$) скорости ветра на территории РФ для высоты флюгера 12 м. Наибольшие значения $u_{\text{год}}$ (до 7-8 м/с) наблюдаются на побережьях Северного Ледовитого и Тихого океанов. В континентальных районах $u_{\text{год}}$ составляет 2-3 м/с, около больших внутренних водоемов $u_{\text{год}}$ повышается до 4-5 м/с.

Величина скорости ветра весьма изменчива. Характеристикой изменчивости ветра является порывистость ветра, которая выражается коэффициентом порывистости:

**Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с)
(Санкт-Петербург, область)**

№ станции	Станция	Высота флюгера (м)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
10	Сухо, маяк	8	7,6	6,9	6,3	5,3	5,4	5,6	5,4	6,2	7,2	8,8	8,9	8,7	6,9
19	Гогланд	14	6,5	5,3	4,9	4,3	4,1	4,2	4,2	4,8	5,3	6,4	7,0	6,8	5,3
22	Кронштадт	22	4,9	4,6	4,5	4,1	4,3	4,5	4,1	4,2	4,8	5,3	5,5	5,3	4,7
23	Ленинград, аэропорт	16	4,9	4,7	4,7	4,3	4,1	4,2	3,6	3,3	3,7	4,3	5,2	5,1	4,3
30	Ломоносов	19	5,4	5,2	4,9	4,7	4,9	5,0	4,6	4,5	5,0	5,5	5,7	5,5	5,1
36	Тихвин	11	4,3	4,2	3,9	3,9	3,8	3,7	3,1	3,0	3,3	3,9	4,4	4,4	3,8

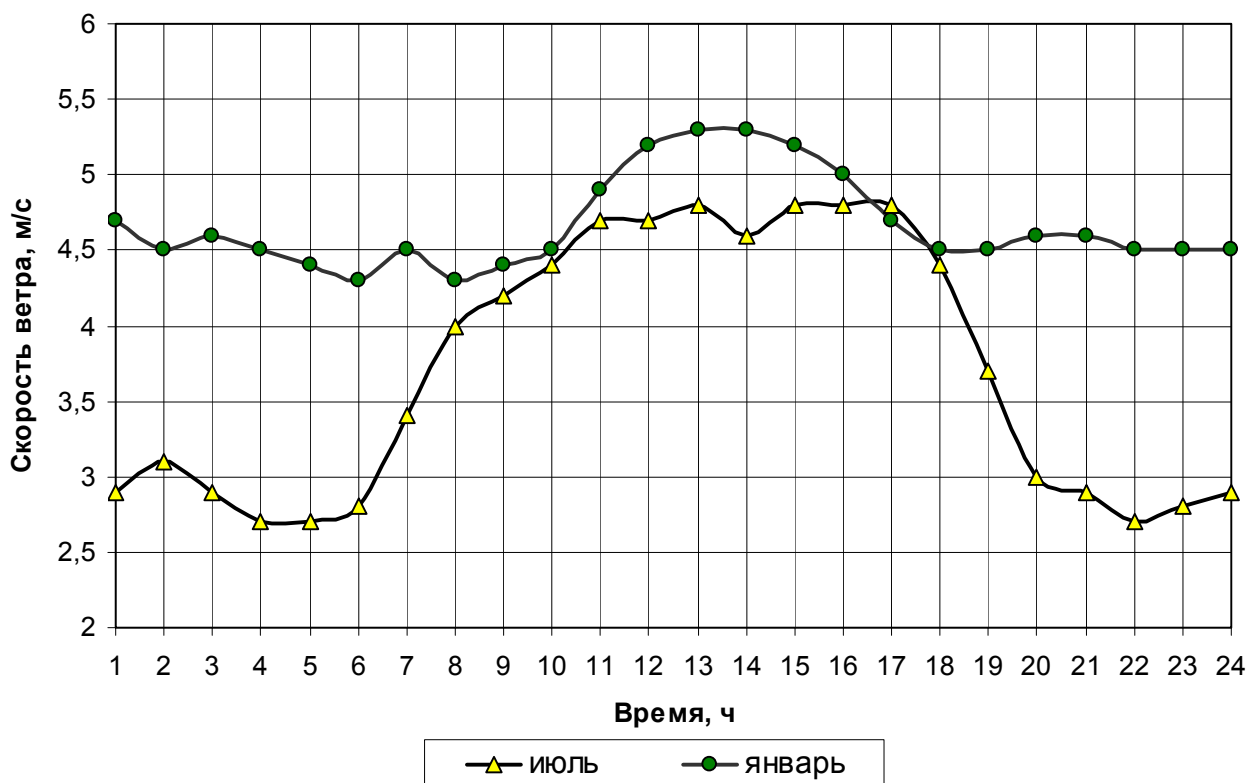


Рис. 5. Суточный ход скорости ветра, г.Хабаровск

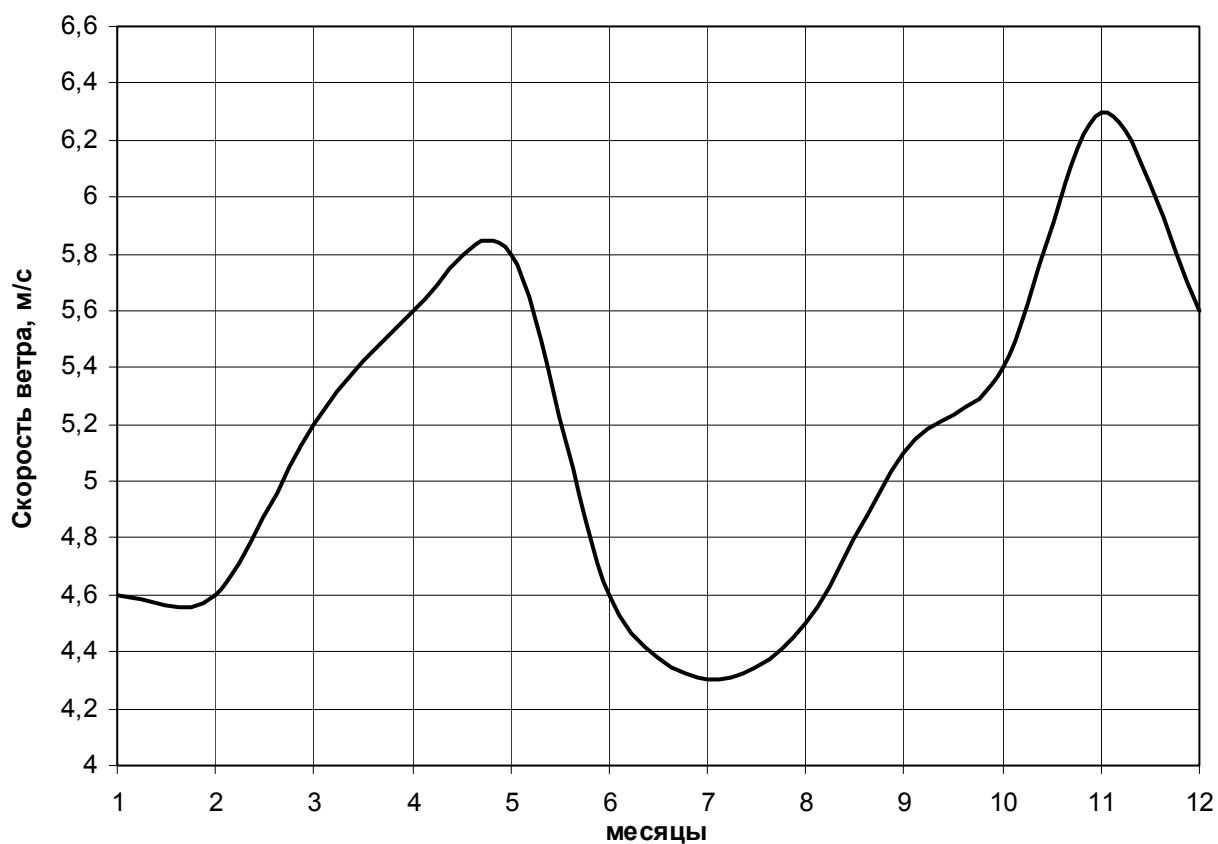


Рис. 6. Годовой ход скорости ветра, г.Хабаровск

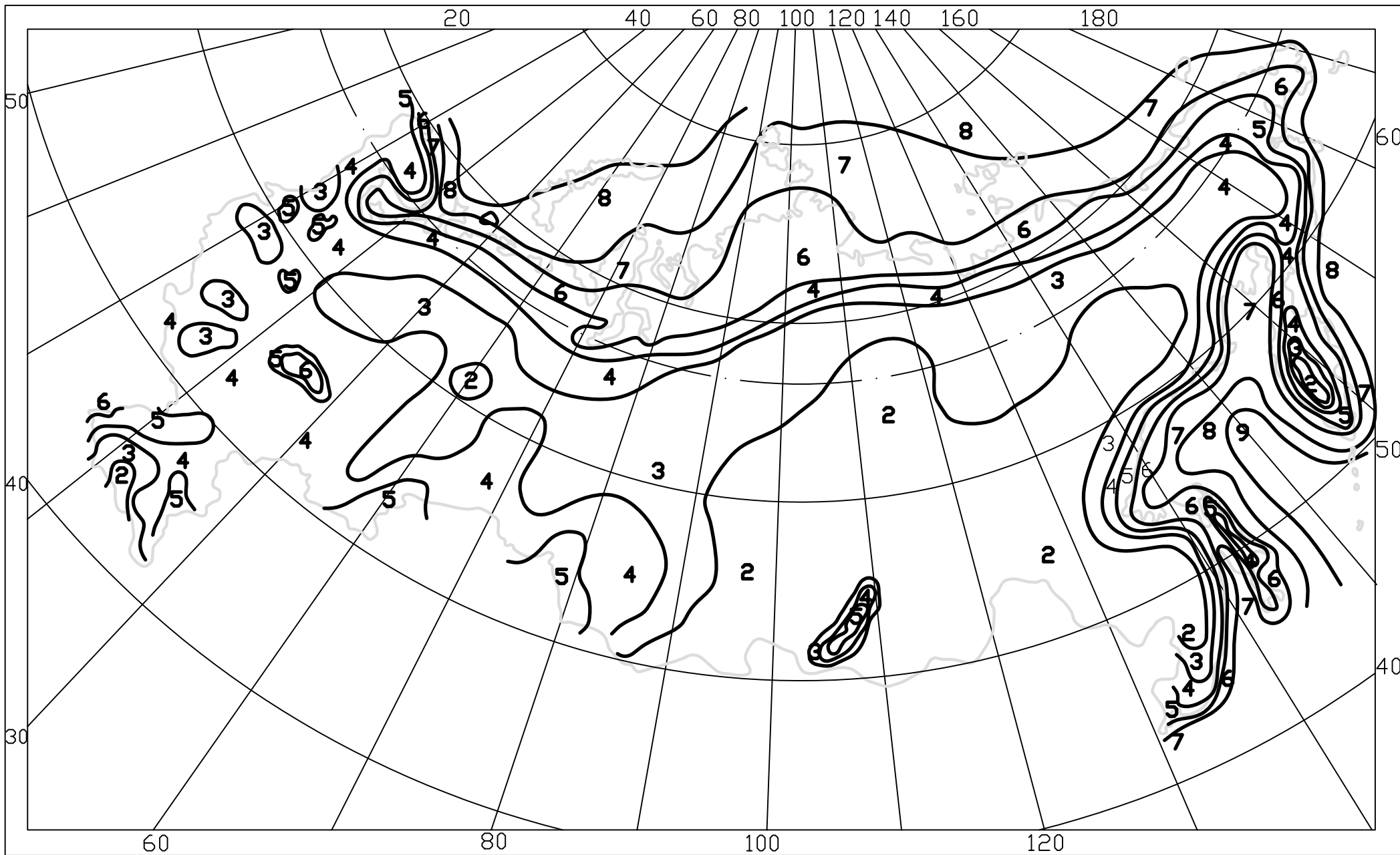


Рис. 7. Среднегодовая скорость ветра (м/с).

$$K_{\text{пор}} = \frac{u_{\text{макс}}}{\bar{u}}, \quad (3)$$

где $u_{\text{макс}}$ – максимально зафиксированная мгновенная скорость ветра на заданном интервале времени;

\bar{u} – среднее значение скорости на этом интервале (обычно не более 2 мин).

$K_{\text{пор}}$ меняется в пределах 1-3, большие значения характерны для более низких средних значений скорости ветра.

Максимальная скорость ветра в порывах является важной характеристикой для оценки надежности работы ВЭУ, прочности ее конструкции. В справочной литературе по результатам многолетних наблюдений приводятся максимальные скорости ветра, возможные один раз в: 1 год, 5, 10, 15 и 20 лет [1, 2, 11]. В таблице 2 приведена такая характеристика ветра для региона с наиболее высоким ветроэнергетическим потенциалом – Хабаровский край, побережье Охотского моря (открытое или внешнее море как часть океана). В таблице 3 приведены максимальные скорости ветра для южного побережья Финского залива (закрытое или внутреннее море).

Часто в повседневном (бытовом) восприятии силу ветра подразделяют по баллам шкалы Бофорта (табл. 4).

2.2. Роза ветров, повторяемость ветра по направлениям, класс открытости станций.

Роза ветров характеризует продолжительность времени в процентном выражении, в течении которого ветер дует в данном направлении. Направление ветра характеризуется румбами и различают 8-ми и 16-ти румбовые розы ветров. Роза ветров определяется по данным многолетних наблюдений за направлением ветра. Эти данные публикуются в справочной литературе в виде таблиц или карт повторяемости направлений ветра и штилей [1,2,11]. В таблице 5 приведена повторяемость направлений ветра и штилей для южного побережья Финского залива (г. Ломоносов), а на рис. 8 построены соответствующие розы ветров для характерных месяцев года.

Данные ветрового режима для каждой метеостанции в значительной степени зависят от класса открытости.

Класс открытости станции определяется по классификации В.Ю.Милевского, принятой в справочнике [2], и характеризует степень

Таблица 2

**Наибольшие скорости ветра (м/с) различной вероятности
(Хабаровский край. Побережье Охотского моря.)**

N станции	Станция	Скорости ветра (м/с) возможные один раз в				
		1 год	5 лет	10 лет	15 лет	20 лет
1	Охотск	25	31	33	34	35
2	Улья	33	39	42	43	44
3	Аян	29	36	40	41	43
4	Байдуков	30	34	36	37	38
5	Сюркум	49	59	64	66	70

Таблица 3

**Наибольшие скорости ветра (м/с) различной вероятности
(Ленинградская область)**

№ станции	Станция	Скорости ветра (м/с), возможные один раз в				
		1 год	5 лет	10 лет	15 лет	20 лет
10	Сухо, маяк	26	30	31	32	33
19	Готланд	25	28	30	31	32
30	Ломоносов	19	22	23	24	25
36	Тихвин	17	19	20	21	22

Повторяемость направлений ветра и штилей (%)

30. Ломоносов									
Месяц	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТИЛЬ
I	4	5	9	18	13	22	18	11	3
II	3	6	10	17	13	19	22	10	4
III	4	8	13	10	8	17	29	11	5
IV	4	7	11	12	10	18	26	12	5
V	6	15	15	7	6	13	24	14	4
VI	6	10	9	8	8	18	25	16	2
VII	6	15	13	8	7	16	21	14	4
VIII	6	12	11	11	10	20	17	13	5
IX	7	7	6	10	13	26	17	14	3
X	8	6	7	12	14	27	13	13	2
XI	4	3	9	20	20	25	10	9	2
XII	5	4	10	19	14	25	12	11	3
Год	5	8	10	13	11	21	20	12	4
К	96	96	66	76	66	66	96	96	

Таблица 6.

Шкала Милевского

Степень открытости флюгера	Формы рельефа		
	Выпуклая (α, α)	Плоская (β, β)	Вогнутая (γ, γ)
<p>Близ водных поверхностей</p> <p>Открытое побережье:</p> <p>океана или открытого (внешнего) моря закрытого (внутреннего) моря залива, большого озера большой реки</p>	<p>12α</p> <p>11α</p> <p>10α</p> <p>9α</p>	<p>11β</p> <p>10β</p> <p>9β</p> <p>8β</p>	<p>10γ</p> <p>9γ</p> <p>8γ</p> <p>7γ</p>
<p>Вдали от водной поверхности</p> <p>Флюгер выше окружающих предметов:</p> <p>нет никаких элементов защищенности (холмы, деревья)</p> <p>отдельные элементы защищенности (то же)</p> <p>среди элементов защищенности (то же)</p> <p>Флюгер ниже окружающих предметов:</p> <p>среди элементов защищенности</p>	<p>8α</p> <p>7α</p> <p>6α</p> <p>4α</p>	<p>7β</p> <p>6β</p> <p>5β</p> <p>4β</p>	<p>6γ</p> <p>5γ</p> <p>4γ</p>

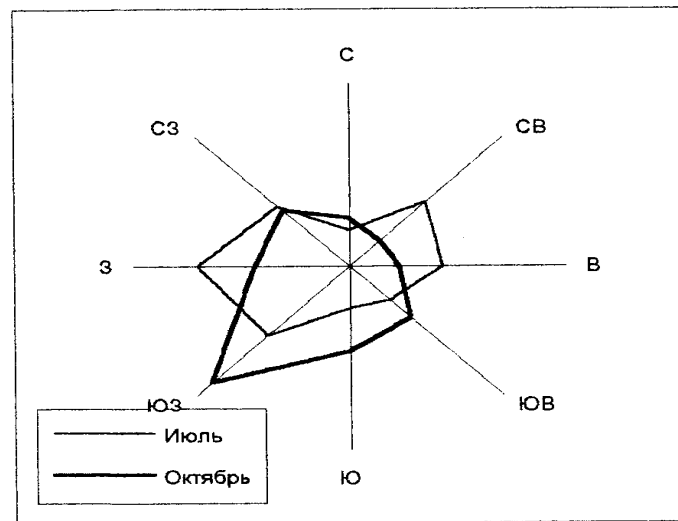
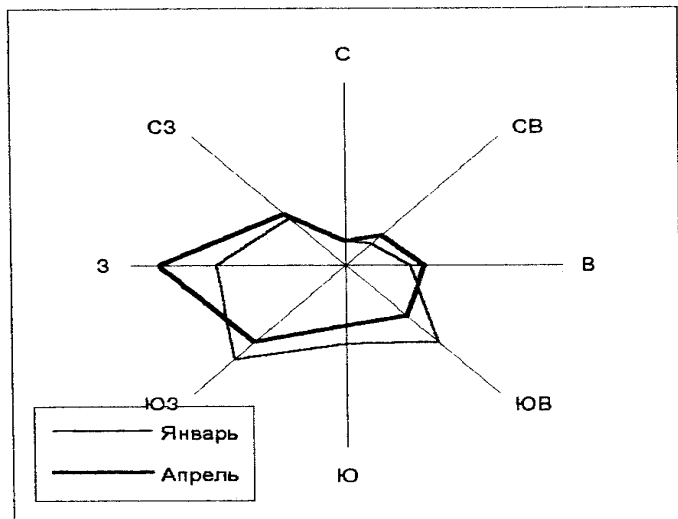


Рисунок 8. Розы ветров южного побережья Финского залива, г.Ломоносов.

открытости флюгера (измерительного прибора) ветровому потоку по каждому румбу направлений. Шкала Милевского приведена в таблице 6.

Наиболее достоверные исходные данные ветрового режима отражают характерные, так называемые репрезентативные станции, общий класс открытости которых не ниже 7б.

Общий класс открытости станции $K_{\text{общ.}}$ определяется по формуле

$$K_{\text{общ.}} = \sum_1^8 K_{\text{табл.}} \cdot \Delta\Phi, \quad (4)$$

где $K_{\text{табл.}}$ – табличный класс открытости по каждому румбу направлений ветра,

$\Delta\Phi$ – табличное значение повторяемости ветра за год данного румба, обычно в %.

Пример:

Из таблицы 6 «Повторяемость направлений ветра и штилей (%)» для станции «Ломоносов» имеем:

Румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
$\Delta\Phi, \%$	5	8	10	13	11	21	20	12	4
$K_{\text{табл.}}$	9б	9б	6б	7б	6б	6б	9б	9б	

$$K_{\text{общ.}} = 9 \cdot 0,05 + 9 \cdot 0,08 + 6 \cdot 0,10 + 7 \cdot 0,13 + 6 \cdot 0,11 + 6 \cdot 0,21 + 9 \cdot 0,20 + 9 \cdot 0,12 = 7,48$$

Таким образом, станция «Ломоносов» является репрезентативной.

Для сведения следует иметь в виду, что $\sum_1^8 \Delta\Phi = 100\%$, исключая штиль.

При построении розы ветров процент повторяемости штилей иногда указывают в центре.

Однако не все метеостанции являются репрезентативными.

Поскольку ветроэнергетические ресурсы определяются для условий открытой местности, на которой может предполагаться строительство ВЭУ и ВЭС, то вводится поправочный коэффициент открытости K_o [8], который определяется по формуле (5).

$$K_o = \sum_1^8 \frac{K_{\text{макс.}}}{K_{\text{табл.}}} \cdot \Delta\Phi, \quad (5)$$

где $K_{\text{макс.}}$ – максимальный коэффициент открытости, который принимают:

$K_{\text{макс.}} = 9$ – для районов, находящихся на открытом побережье моря или океана, а также для островов;

$K_{\text{макс.}} = 8$ – для районов, находящихся в прибрежной зоне;

$K_{\text{макс.}} = 7$ – для районов, удаленных от береговой линии.

Если максимальное значение табличного коэффициента открытости $K_{\text{табл.макс.}}$ больше, чем указанные выше значения $K_{\text{макс.}}$, то следует принять:

$$K_{\text{макс.}} = K_{\text{табл.макс.}}$$

Пример определения поправочного коэффициента открытости для метеостанции «Ломоносов»:

В соответствии с рекомендациями принимаем $K_{\text{макс.}} = 9$.

По формуле (5) имеем:

$$K_0 = 9/9 \cdot 0,05 + 9/9 \cdot 0,08 + 9/6 \cdot 0,10 + 9/7 \cdot 0,13 + 9/6 \cdot 0,11 + 9/6 \cdot 0,21 + 9/9 + 0,20 + 9/9 \cdot 0,12 = 1,21.$$

Скорость ветра для условий полностью открытой местности $u_{\text{откр.}}$ с учетом поправочного коэффициента K_0 определяется соотношением (6).

$$u = u_{\text{табл.}} \cdot K_0, \quad (6)$$

где $u_{\text{табл.}}$ – табличное (заданное) значение скорости ветра без учета поправки на открытость.

2.3. Об изменении скорости ветра с высотой.

Исходные данные ветрового режима для каждой метеостанции определяются на заданной высоте флюгера $h_{\text{ф}}$, на которой установлен анемометр. Стандартная высота $h_{\text{ф}} = 10$ м, однако, на некоторых станциях могут быть отклонения (12 м, 14 м, 18 м).

При ветроэнергетических расчетах скорость ветра на большей высоте H (на высоте расположения ветровой турбины ВЭУ) определяют с учетом поправочного коэффициента высоты K_h по степенному закону:

$$K_h = \left(\frac{H}{h_{\text{ф}}} \right)^m, \quad (7)$$

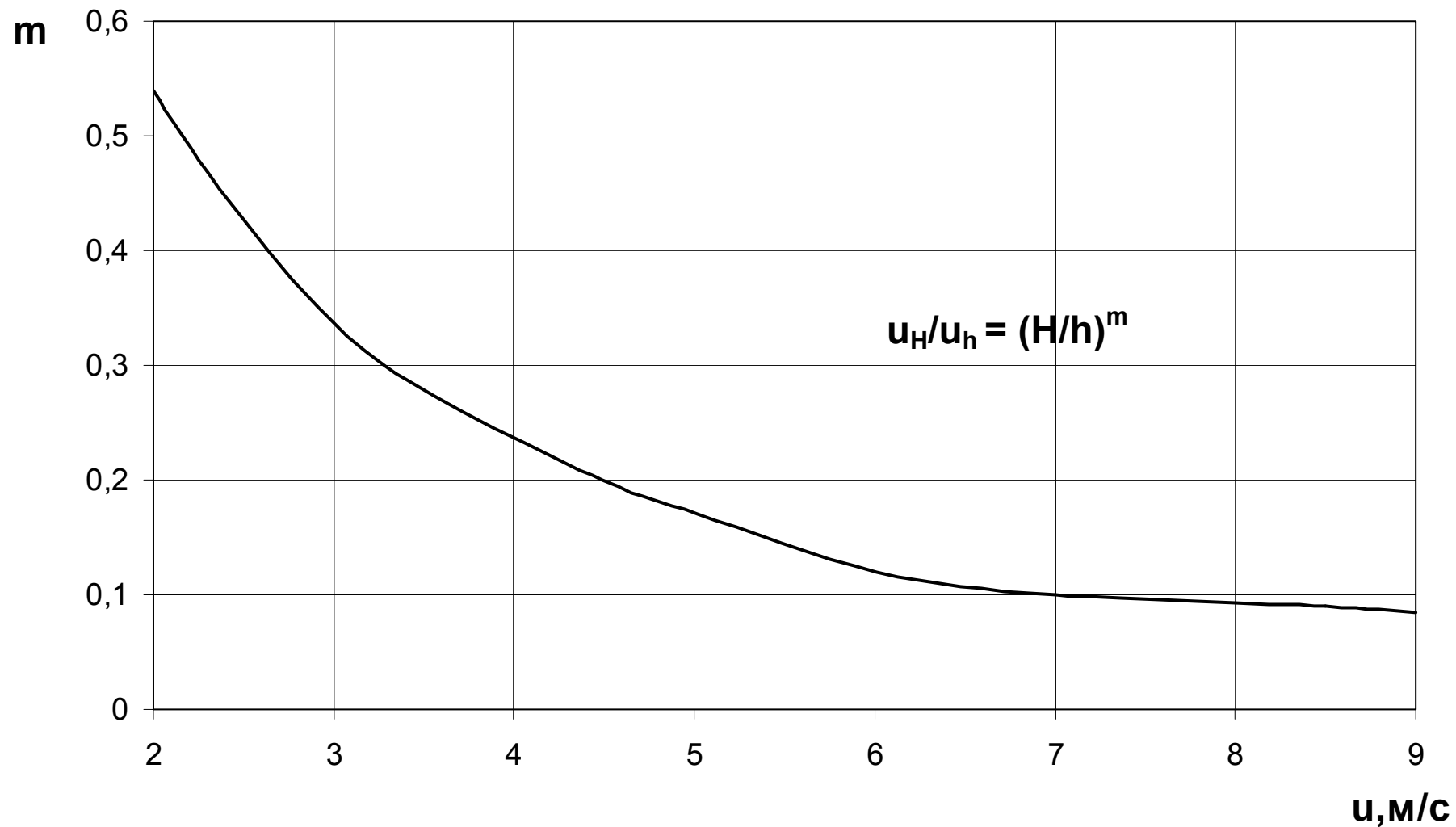


Рис. 9. Зависимость показателя степени m степенного закона изменения скорости ветра с высотой для шероховатой подстилающей поверхности (в 100-метровом слое)

где показатель степени m в общем случае сложным образом зависит от скорости ветра, рельефа местности и шероховатости поверхности.

Строительство ВЭУ и ВЭС средней и большой мощности предполагается обычно в районах с относительно ровной поверхностью местности и низкой шероховатостью (травяной покров).

При ветроэнергетических расчетах показатель степени m в выражении (7) принимают по следующей зависимости от скорости ветра:

u	м/с	0-3	3,5-4	4,5-5	5,5	6-11,5	12,-12,5	13-15	≥ 15
m	--	0,20	0,180	0,160	0,150	0,140	0,135	0,130	0,125

Скорость ветра u_H на высоте H выражается через скорость ветра u_h на высоте флюгера h_f соотношением (8).

$$u_H = u_h \cdot K_h \quad (8)$$

Для основного ветрового диапазона работы ВЭУ большой мощности на ровной площадке обычно $m \approx 0,14$.

Для большей шероховатости (кусты, деревья) показатель степени m для высот выше уровня шероховатости может быть принят по зависимости на рис. 9 [9].

2.4. Вероятность скорости ветра по градациям, интегральная и дифференциальная повторяемости ветра.

Вероятность скорости ветра по градациям является важнейшей характеристикой ветрового кадастра. Это распределение является повторяемостью или вероятностью значений заданных скоростей ветра (градацией) в % от общего числа случаев за рассматриваемый период времени (месяц, год). В табл. 7 приведено такое типовое распределение для южного побережья Финского залива (г. Ломоносов), полученное в результате многолетних наблюдений [2].

Вероятность скорости ветра по градациям дает как дифференциальную зависимость повторяемости скорости ветра, так и интегральную зависимость повторяемости скорости ветра на интервале от 0 до заданного значения. Эти зависимости для годового распределения из табл. 7 можно представить в виде:

Таблица 7.

Вероятность скоростей ветра по градациям (в % от общего числа случаев)

30. Ломоносов												
Месяц	Скорость (м/с)											
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20	21-24	25-28
I	11.4	20.4	24.8	21.2	12.4	4.8	3.4	1.3	0.3	0.03	0.0	0.0
II	12.8	19.7	26.1	20.1	10.7	5.6	3.6	1.1	0.3	0.03	0.0	0.0
III	15.0	22.4	25.8	18.5	10.0	4.3	2.5	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0
IV	15.1	23.6	27.5	17.7	9.9	3.4	2.0	0.7	0.1	0.03	0.0	0.0
V	12.7	20.2	29.7	20.6	9.8	3.9	2.2	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
VI	9.3	22.3	30.7	21.9	9.8	2.9	2.5	0.4	0.1	0.06	0.0	0.03
VII	13.1	24.9	30.2	18.9	8.0	3.3	1.3	0.2	0.06	0.0	0.0	0.0
VIII	14.7	26.3	27.9	18.7	7.3	2.7	1.5	0.6	0.2	0.06	0.0	0.0
IX	11.4	21.8	28.2	20.1	10.9	4.3	2.4	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
X	9.1	19.5	26.9	22.1	11.6	4.6	3.5	2.0	0.6	0.1	0.0	0.0
XI	8.5	18.2	26.8	21.3	12.5	6.5	4.0	1.5	0.6	0.1	0.0	0.0
XII	10.4	19.5	23.4	20.9	14.5	5.1	4.2	1.8	0.2	0.03	0.0	0.0
Год	11.9	21.6	27.4	20.2	10.6	4.3	2.7	1.03	0.2	0.03	1.03	0.0

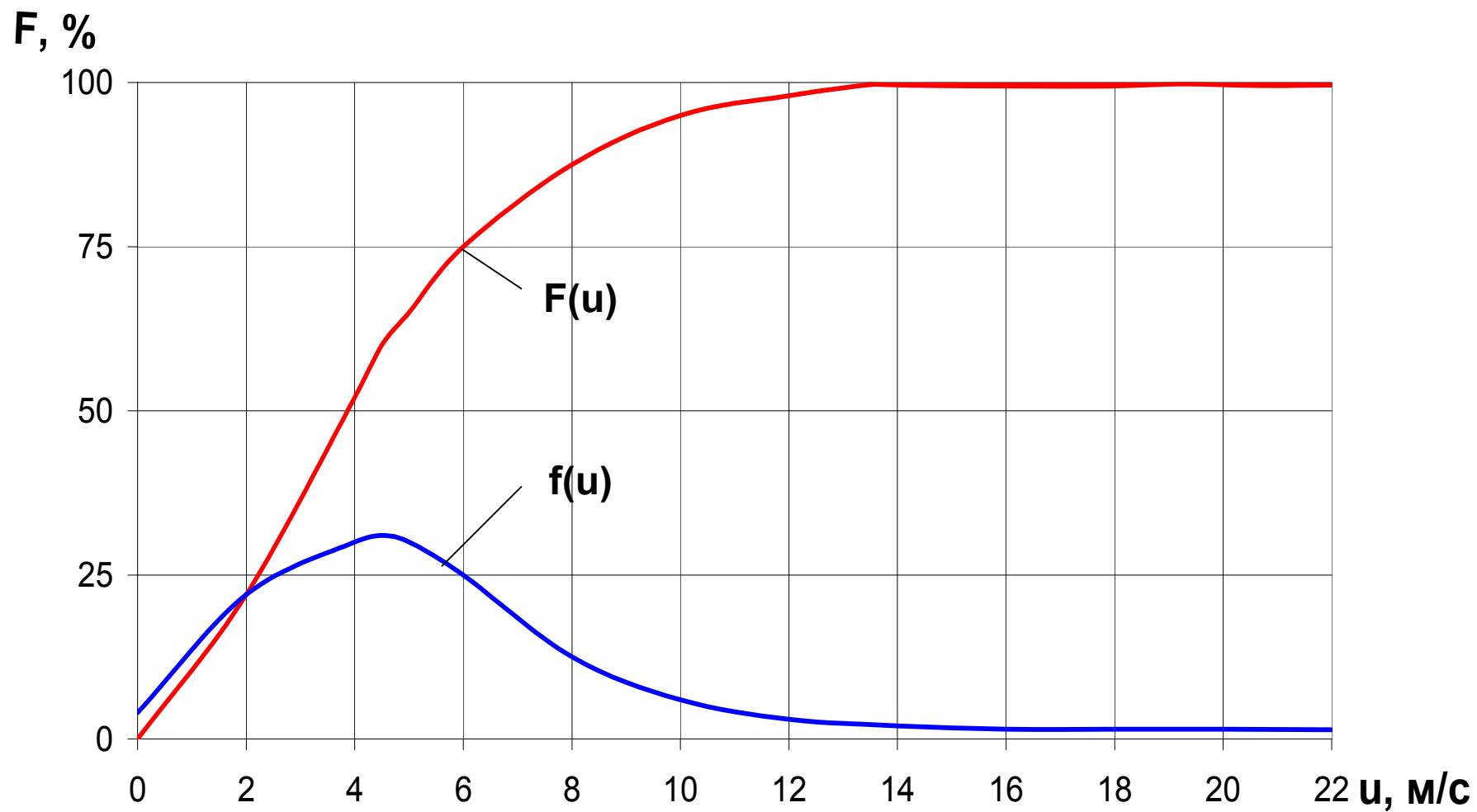


Рис.10. Интегральная $F(u)$ и дифференциальная $f(u)$ повторяемости скорости ветра (станция Ломоносов)

Градация скорости	$u_{гр}$	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
Среднее значение градации	u	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19
Дифференциальная повторяемость	$dF=f(u)$	11,9	21,6	27,4	20,2	10,6	4,3	2,7	1,03	0,2	0,03
Интегральная повторяемость	$F(u)$	11,9	33,5	60,9	81,1	91,7	96,0	98,7	99,73	99,93	99,95

Последняя строка в данной таблице получается из предпоследней путем суммирования:

$$F(u) = \sum_0^u \Delta F_i . \quad (9)$$

Дискретные табличные данные могут быть математически обработаны и получены непрерывные функции дифференциальной повторяемости $f(u)$ и интегральной повторяемости $F(u)$:

$$F(u) = \int_0^u f(u) \cdot du . \quad (10)$$

На рис. 10 указанные зависимости представлены в графическом виде.

2.5. Математические функции распределения скорости ветра.

Чаще всего пользуются распределением Вейбулла-Гудрича, отражающим повторяемость скорости ветра для условий равнинной местности [1, 7].

Интегральная повторяемость:

$$F(u) = 1 - e - (u/\beta)^\gamma = 1 - \exp \left[- (u/\beta)^\gamma \right] \quad (11)$$

Дифференциальная повторяемость:

$$f(u) = \frac{dF}{du} = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{u}{\beta} \right)^{\gamma-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{u}{\beta} \right)^\gamma \right] . \quad (12)$$

Параметр масштаба β имеет размерность (м/с) и близок к значению $1,1 \cdot u_{год}$. Безразмерный параметр формы γ меняется в пределах от 0,8 до 2÷2,5. На рис. 11 и рис. 12 приведены изолинии указанных параметров для территории РФ (по результатам разработок ГГО им. Воейкова [11]).

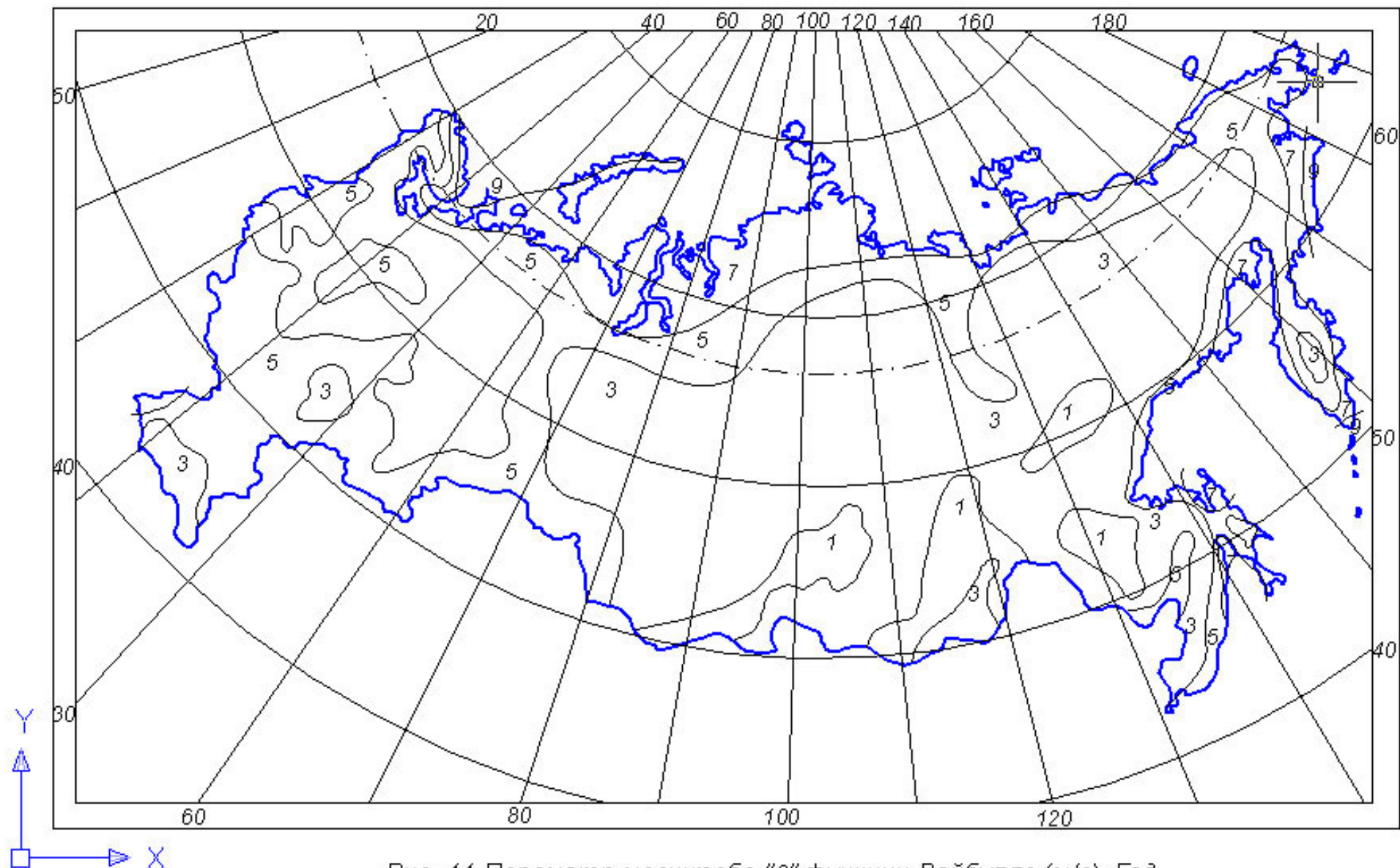


Рис. 11. Параметр масштаба "В" функции Вейбулла ($\text{m/s} \cdot \text{Год}$)

Параметры β и γ связаны между собой через среднее значение скорости ветра:

$$\beta = \frac{u_{\text{год}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}, \quad (13)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ – гамма функция.

Математическое распределение Гриневича имеет вид:

$$f(u) = \alpha \cdot \frac{\Delta u}{u} \cdot \left(\frac{u}{u_{\text{год}}}\right)^p \cdot \exp\left[-k \cdot \left(\frac{u}{u_{\text{год}}}\right)^n\right], \quad (14)$$

где $u_{\text{год}}$ – среднегодовая скорость ветра;

α , p , k , n – безразмерные параметры уравнения.

На основании уравнения (14) математическим путем получены таблицы распределения скоростей ветра по градациям, приведенными в приложении .
Которыми можно пользоваться при ветроэнергетических расчетах.

2.6. Мощность ветрового потока, коэффициент использования установленной мощности ВЭУ, плотность технического ветропотенциала.

Мощность ветрового потока (N) через площадь, перпендикулярную направлению потока, определяется выражением [3]:

$$N = \frac{1}{2} \rho u^3 \cdot F \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right] = 0,613 \cdot u^3 \cdot F [\text{Вт}], \quad (15)$$

где u – скорость потока (ветра), м/с;

F – площадь, м²;

ρ – массовая плотность воздуха, $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$.

$$\rho = \frac{\gamma}{g}, \quad (16)$$

где γ – уд. вес воздуха, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Удельная мощность ветрового потока:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{F} = 0,613 \cdot u^3 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right). \quad (17)$$

Выражение (17) определяет мгновенную мощность ветрового потока со скоростью u в данный момент времени.

Природные ветроэнергетические ресурсы (ветроэнергетический потенциал) определяются как среднегодовая удельная мощность ветрового потока:

$$N_e = \frac{\mathcal{E}_{\text{год.уд.}}}{T_{\text{год}}} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right), \quad (18)$$

где $T_{\text{год}} = 8760$ ч – число часов в году;

$\mathcal{E}_{\text{год.уд.}}$ – удельная годовая энергия ветрового потока, (Вт·ч).

Имея годовое распределение скорости ветра по градациям, можно определить энергию каждой градации ($\Delta\mathcal{E}_{\text{гр.}}$) и операцией дискретного суммирования получить $\mathcal{E}_{\text{год.уд.}}$.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{год.уд.}} &= \sum_0^{u_{\text{макс}}} \Delta\mathcal{E}_{\text{гр.}} = \sum_0^{u_{\text{макс}}} N(\Delta t_{\text{гр.}}) = \sum_0^{u_{\text{макс}}} \frac{1}{2} \rho \cdot u^3 \cdot (T_{\text{год}} \cdot dF) = \frac{1}{2} \rho \cdot T_{\text{год}} \cdot \sum_0^{u_{\text{макс}}} u^3 \cdot dF = \\ &= 0,613 \cdot 8760 \cdot \sum_0^{u_{\text{макс}}} u^3 \cdot dF, \quad (\text{Вт}\cdot\text{ч}) \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда в соответствии с выражением (18) имеем:

$$N_e = 0,613 \cdot \sum_0^{u_{\text{макс}}} u^3 \cdot dF, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (20)$$

Переходя от дискретного суммирования к математическому интегрированию годовой функции распределения скорости ветра, получим известное выражение:

$$N_e = \frac{1}{2} \rho \int_0^{u_{\text{макс}}} u^3 \cdot dF = 0,613 \cdot \int_0^{u_{\text{макс}}} u^3 \cdot f(u) \cdot du, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (21)$$

В соответствии с (21) в результате математических преобразований величина N_e может быть выражена через параметры β и γ функции Вейбулла [3]:

$$N_e = \frac{1}{2} \rho \cdot \beta^3 \cdot \Gamma\left(\frac{3}{\gamma} + 1\right), \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (22)$$

где $\frac{1}{2} \rho = 0,613$;

8	4	8,1	8,3	8,1	7,7	7,3	6,8	6,3	5,6	5,1	4,5	4	3,6	3,1	2,6	2,4	2	1,7	1,5	1,3	1	5
8,1	3,9	8	8,2	8	7,7	7,3	6,7	6,2	5,6	5,1	4,6	4	3,6	3,1	2,7	2,4	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	5,2
8,2	3,9	7,9	8,1	7,9	7,6	7,2	6,7	6,2	5,6	5,1	4,6	4	3,6	3,2	2,7	2,4	2,1	1,8	1,6	1,3	1,1	5,4
8,3	3,9	7,8	8	7,8	7,5	7,1	6,6	6,2	5,6	5,1	4,6	4	3,6	3,2	2,8	2,5	2,1	1,8	1,6	1,4	1,1	5,7
8,4	3,8	7,7	7,9	7,7	7,5	7,1	6,6	6,1	5,6	5,1	4,6	4,1	3,7	3,2	2,8	2,5	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	5,9
8,5	3,8	7,6	7,8	7,7	7,4	7	6,5	6,1	5,6	5,1	4,6	4,1	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	6,2
8,6	3,7	7,5	7,7	7,6	7,4	7	6,5	6,1	5,5	5,1	4,6	4,1	3,7	3,3	2,8	2,6	2,2	1,9	1,6	1,5	1,2	6,4
8,7	3,7	7,5	7,6	7,5	7,3	6,9	6,5	6	5,5	5,1	4,6	4,1	3,7	3,3	2,9	2,6	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	6,6
8,8	3,6	7,4	7,5	7,5	7,2	6,8	6,5	6	5,5	5,1	4,6	4,1	3,7	3,3	2,9	2,6	2,3	2	1,7	1,5	1,3	6,9
8,9	3,6	7,3	7,5	7,4	7,1	6,8	6,4	6	5,5	5,1	4,6	4,1	3,7	3,3	2,9	2,6	2,3	2	1,7	1,6	1,3	7,2
9	3,6	7,2	7,4	7,3	7,1	6,7	6,4	5,9	5,4	5,1	4,6	4,1	3,8	3,3	2,9	2,6	2,3	2	1,8	1,6	1,4	7,5
9,1	3,5	7,1	7,3	7,3	7	6,6	6,3	5,9	5,4	5	4,6	4,1	3,8	3,4	3	2,6	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	7,8
9,2	3,5	7	7,3	7,2	6,9	6,6	6,3	5,9	5,4	5	4,6	4,1	3,8	3,4	3	2,6	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	8,1
9,3	3,5	7	7,2	7,1	6,9	6,5	6,2	5,8	5,4	5	4,6	4,1	3,8	3,4	3	2,7	2,4	2,1	1,8	1,6	1,5	8,4
9,4	3,5	6,9	7,1	7	6,8	6,5	6,2	5,8	5,3	5	4,6	4,1	3,8	3,4	3	2,7	2,4	2,2	1,9	1,6	1,5	8,7
9,5	3,4	6,8	7	6,9	6,7	6,5	6,2	5,8	5,3	5	4,6	4,1	3,8	3,4	3	2,7	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	9
9,6	3,4	6,7	6,9	6,9	6,7	6,5	6,1	5,7	5,3	5	4,5	4,1	3,8	3,4	3,1	2,7	2,5	2,2	1,9	1,7	1,6	9,3

Средняя скорость ветра ,м/с	СКОРОСТЬ ВЕТРА. м/с																					
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Третий тип распределения скоростей																						
9,7	3,4	6,6	6,9	6,8	6,6	6,4	6,1	5,7	5,3	5	4,5	4,1	3,8	3,4	3,1	2,7	2,5	2,2	2	1,7	1,6	9,6
9,8	3,4	6,6	6,8	6,7	6,6	6,4	6	5,6	5,2	4,9	4,5	4,1	3,8	3,5	3,1	2,8	2,5	2,3	2	1,7	1,6	9,9
9,9	3,3	6,5	6,7	6,7	6,5	6,3	6	5,6	5,2	4,9	4,5	4,1	3,8	3,5	3,1	2,8	2,6	2,3	2	1,8	1,6	10,2
10	3,3	6,5	6,6	6,6	6,5	6,3	5,9	5,6	5,2	4,9	4,5	4,1	3,8	3,5	3,1	2,8	2,6	2,3	2	1,8	1,6	10,5

β - см. выражение (13); для вычисления гамма-функции $\Gamma\left(\frac{3}{\gamma} + 1\right)$ можно воспользоваться таблицей 8, используя при этом свойство гамма-функции: $\Gamma(\gamma + 1) = \gamma \cdot \Gamma(\gamma)$.

Годовая выработка ВЭУ.

Для определения годовой выработки ВЭУ необходимо иметь ее характеристику отдачи мощности (рис. 1б), и годовое распределение скорости ветра по градациям. Характеристику отдачи мощности удобно представлять в относительных единицах:

$$\bar{N}(u) = \frac{N(u)}{N_{\text{ВЭУ}}}, \quad (23)$$

где $N_{\text{ВЭУ}}$ – установленная (номинальная) мощность ВЭУ, кВт.

Годовая выработка ВЭУ выражается как дискретное суммирование выработок на каждой градации скорости ветра ($\Delta \mathcal{E}_{\text{ВЭУ гр.}}$) от начальной скорости u_0 до максимальной рабочей скорости ВЭУ $u_{\text{макс}}$ или соответственно как математическое интегрирование годовой функции распределения скорости ветра:

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}} = \sum_{u_0}^{u_{\text{макс}}} \Delta \mathcal{E}_{\text{ВЭУ гр.}} \quad (24)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ВЭУ гр.}} = N(u) \cdot (\Delta t_{\text{гр.}}) = N_{\text{ВЭУ}} \cdot \bar{N}(u) \cdot (T_{\text{год}} \cdot dF). \quad (25)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}} = N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{год}} \cdot \sum_{u_0}^{u_{\text{макс}}} \bar{N}(u) \cdot dF = N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{год}} \cdot \int_{u_0}^{u_{\text{макс}}} \bar{N}(u) \cdot f(u) \cdot du. \quad (26)$$

Из (25) следует:

$$\int_{u_0}^{u_{\text{макс}}} \bar{N}(u) \cdot f(u) \cdot du = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}}{N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{год}}} =$$

$$= \frac{\text{фактическая_годовая_выработка}}{\text{теоретическая_годовая_выработка_по_установленной_мощности}}.$$

Приведенное выше отношение называют коэффициентом использования установленной мощности ВЭУ:

$$K_{\text{исп}} = \int_0^{u_{\text{макс}}} \bar{N}(u) \cdot f(u) \cdot du \cong \sum_{u_0}^{u_{\text{макс}}} \bar{N}(u) \cdot dF. \quad (27)$$

$$K_{\text{исп}} = \frac{N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{исп}}}{N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{год}}} = \frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{год}}}, \quad (28)$$

где $T_{\text{исп}}$ – годовое число часов использования установленной мощности ВЭУ.
Годовая выработка ВЭУ:

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}} = N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{исп}}. \quad (29)$$

Величина $K_{\text{исп}}$, а следовательно годовая выработка конкретной ВЭУ, зависит от характеристики отдачи мощности ВЭУ, но еще в большей степени зависит от функции распределения скорости ветра (вероятности скорости ветра по градациям).

$K_{\text{исп}}$ может меняться от $0,1 \div 0,15$ для районов с низкой среднегодовой скоростью ветра ($u_{\text{год}} = 3 \div 4$), до $0,2 \div 0,4$ и более для районов с $u_{\text{год}} = 5 \div 7$ и выше.

Плотность технического ветроэнергетического потенциала определяется годовой выработкой ВЭУ, а также зависит от площади, занимаемой ВЭУ, т. е. от размещения ВЭУ на местности. Возможные конфигурации размещения ВЭУ в зависимости от преобладающего направления ветра показаны на рис. 13. Площадь территории, приходящейся на одну ВЭУ в составе ветрового парка, равна:

$$S_{\text{ВЭУ}} = k_1 \cdot k_2 \cdot D^2 \quad [\text{м}^2]. \quad (30)$$

Соответственно плотность технического ветроэнергетического потенциала будет иметь выражение:

$$\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}}{k_1 \cdot k_2 \cdot D^2} = \frac{N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{исп}}}{k_1 \cdot k_2 \cdot D^2}. \quad (31)$$

При отсутствии выраженного преобладающего направления ветра (приблизительно при симметричной розе ветров) для общей оценки величины $\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}}$ можно принять $k_1 = k_2 = 10$. Соответственно будем иметь:

$$\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}} = \frac{N_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{исп}}}{100 \cdot D^2} \left[\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2} \right], \quad (32)$$

где D – диаметр ветроколеса ВЭУ в м.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РЕГИОНА

3.1. Комплекс вопросов, подлежащих разработке:

- краткая характеристика региона и анализ ветрового кадастра, в соответствии с заданием;
- расчеты по определению природного ветроэнергетического потенциала;
- расчеты по определению технического ветроэнергетического потенциала;
- оформление карты ветроэнергетических ресурсов региона.

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки, карты ветроэнергетических ресурсов и итоговой таблицы, как приложение к карте.

3.2. Краткая характеристика региона и анализ ветрового кадастра.

Краткая характеристика включает в себя основные общие данные по региону: его местоположение, площадь территории, природные условия, основные административные центры и населенность, а также общие краткие сведения об энергетике региона (по данным географического атласа, картам и справочной литературы).

Анализ ветрового кадастра региона.

Анализ ветрового режима выполняется на основе данных многолетних наблюдений, опубликованных в официальных справочниках и др. научно-технических изданиях, при этом рассматривается сеть метеорологических станций на территории региона [1-3, 6-8, 11].

Для выполнения курсовой работы используется географическая карта региона (области, края республики) масштаба от 1:400000 до 1:1000000. На карту наносятся метеостанции, указанные в справочниках. При большом количестве метеостанций выбираются основные метеостанции с более высоким значением среднегодовой скорости ветра, станции должны отражать всю территорию региона. Для основных метеостанций по данным справочной литературы в пояснительной записке приводятся следующие характеристики ветрового режима:

- повторяемость направлений ветра и штилей, включая класс открытости станций (с изображением розы ветров на карте);
- среднемесячные и годовые скорости ветра (с построением графика годового хода ветра);
- наибольшие скорости ветра;
- суточный ход скорости ветра (график) для характерной метеостанции;
- вероятность скорости ветра по градациям (для репрезентативных основных станций).

Для характерной метеостанции выполняются расчеты и строятся графики дифференциальной и интегральной повторяемости скорости ветра.

3.3. Порядок расчетов по определению природного ветроэнергетического потенциала.

Природный ветропотенциал определяется выражениями (20) или (21). При расчетах для каждой метеостанции следует учесть поправки на коэффициент открытости (раздел 2.1) и коэффициент высоты (раздел 2.2).

Пример табличного вычисления природного ветроэнергетического потенциала для района Санкт – Петербурга, г. Ломоносов.

$K_0=1,21$ в соответствии с п. 2.1;

K_h – определен в соответствии с п. 2.2(формула 7);

$H=50$ м;

$h_\phi=19$ м (станция Ломоносов)

Пример табличного расчета N_e для района г. Ломоносов.

$u_{гр}$	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20
u	0.5	2.5	4.5	6.5	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5	19
K_0	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
K_h	1.22	1.22	1.19	1.15	1.15	1.15	1.14	1.14	1.13	1.13
$u_{пр}=uK_0K_h$	0.74	3.70	6.48	9.04	11.8	14.6	17.2	20.0	22.6	26.0
dF	0.119	0.216	0.274	0.202	0.106	0.043	0.027	0.010	0.002	0.0003
$u_{пр}^3 dF$	0.05	10.9	74.5	149	174	134	137	80	23.1	5.3

$$N_e = 0.613 \sum_0^{u_{\max}} u_{пр}^3 dF = 788 \quad \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$$

Расчеты N_e выполняются для характерных основных метеостанций региона, величина N_e указывается на карте и вносится в итоговую таблицу (раздела 3.5) в графу природного ветроэнергетического потенциала региона.

Для ряда регионов в справочнике по климату [2] и др. источниках таблицы вероятности скорости ветра по градациям приводятся не для всех метеостанций. Для выполнения курсовой работы необходимое количество метеостанций определяется охватом всей территории задаваемого региона, при этом для некоторых характерных метеостанций региона таблицы вероятности скорости ветра по градациям отсутствуют. В этих случаях, а также в тех случаях, когда в некоторых районах задаваемого региона вообще нет данных о метеостанциях, можно пользоваться стандартными математическими функциями распределения скорости ветра (раздел 2.5), параметрами функции Вейбулла (рис. 11 и 12), таблицей 8 [п.1] повторяемости скоростей ветра по уравнению Гриневича.

3.4. Порядок расчетов по определению технического ветроэнергетического потенциала.

Для определения плотности технического ветроэнергетического потенциала ($\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}}$) необходимо принять в соответствии с заданием типовую ВЭУ с заданной характеристикой отдачи мощности (рис. 1). Расчеты потенциала выполняются для всех характерных метеостанций (см. раздел 3.2), чтобы можно было проследить распределение $\mathcal{E}_{\text{техн. уд.}}$ по всей территории заданного региона.

В разделе 2.6 приведены аналитические выражения для расчетов $\mathcal{E}_{\text{техн. уд.}}$: (27)-(32).

Ниже в табличной форме дан пример расчета плотности технического потенциала района г. Ломоносов, С-Петербург, при этом принята ВЭУ типа MICON-400 (рис. 1), основные параметры:

$N_{\text{ВЭУ}}=400$ кВт, $D=31$ м, $H=36$ м, характерные значения скорости ветра на характеристике отдачи мощности – $u_0=4$ м/с, $u_p=15$ м/с, $u_{\text{МАКС}}=25$ м/с.

$K_0=1,21$ в соответствии с п. 2.1;

K_h – определен в соответствии с п. 2.2 (формула 7);

$H=36$ м, $h_\phi=19$ м (станция Ломоносов).

Используя последнюю строку таблицы определяется общий коэффициент использования энергии ветра $K_{исп}$.

$u_{гр}$	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20	21-24
u , м/с	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19,0	22,5
K_0	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
K_h	1,135	1,135	1,122	1,093	1,093	1,093	1,089	1,086	1,084	1,084	1,084
$u_{пр}$, м/с	0,69	3,4	6,1	8,6	11,2	13,9	16,5	19,1	21,6	24,9	29,5
N , кВт	0	0	50	125	250	370	410	400	400	400	0
$\bar{N}(u_{пр})$	0	0	0,125	0,312	0,625	0,925	1,025	1,0	1,0	1,0	0
dF	0,119	0,216	0,274	0,202	0,106	0,043	0,027	0,010	0,002	0,0003	~0
$\bar{N}(u_{пр}) \cdot dF$	0	0	0,0342	0,063	0,0662	0,04	0,0277	0,01	0,002	0,0003	0

$$K_{исп} = \sum_{u_0}^{u_{макс}} \bar{N}(u) \cdot dF = 0,243$$

$$T_{исп} = T_{год} \cdot K_{исп} = 8760 \cdot 0,243 = 2130 \text{ ч}$$

$$\mathcal{E}_{техн. уд.} = \frac{N_{ВЭУ} \cdot T_{исп}}{100 \cdot D^2} = \frac{400 \cdot 2130}{100 \cdot 31^2} = 8,86 \left[\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}}{\text{км}^2} \right].$$

Расчеты для других характерных метеостанций региона выполняются с помощью программы “Consumpt 1” в следующей последовательности:

а) Табличный ввод распределения вероятности скорости ветра по градациям для метеостанций региона:

dF (%) в зависимости от $u_{пр.} = u \cdot K_0$

Для характерных метеостанций, не имеющих в справочнике таблицы значений вероятности скорости ветра по градациям, следует воспользоваться таблицей Гриневича (табл. 8). При этом на поправочный коэффициент открытости станции K_0 умножается среднегодовая скорость ветра $u_{год}$ для этой станции, а затем по значению $K_0 \cdot u_{год}$ и типу распределения берётся соответствующая строчка вероятности скорости ветра по градациям.

б) Ввод числовых исходных данных высоты флюгера метеостанции h_f [м], высоты башни заданной ВЭУ H [м], принятого временного периода расчета – год.

в) ввод табличной характеристики отдачи мощности заданной типовой ВЭУ:

$$N_{(\text{кВт})} = f(u_{\text{пр.}})$$

примечание: поправочный коэффициент высоты K_h в программу "Consumpt 1" не вводится т.к. он предусмотрен в алгоритме программы.

г) результаты расчета по программе "Consumpt 1"

Коэффициент использования установленной мощности ВЭУ – $K_{\text{исп}}$ [%]

Годовая выработка ВЭУ – $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ [кВт·ч],

Контрольные распечатки:

- расчетная таблица с полученными величинами $K_{\text{исп}}$ [%] и $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ [кВт·ч],
- график характеристики отдачи мощности ВЭУ $N(u)$ [кВт],
- график дифференциальной повторяемости скорости ветра $f(u)$.

Контрольные распечатки следует сделать для одной характерной метеостанции и заданной типовой ВЭУ и вложить их в пояснительную записку по курсовой работе.

3.5. Выводы по расчетам и анализу ветроэнергетических ресурсов региона.

1) Расчеты по определению $K_{\text{исп}}$ [%], $T_{\text{исп}}$ [ч], $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ [млн(кВт·ч)] и $\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}}$ [$\frac{\text{млн. (кВт} \cdot \text{ч)}{\text{км}^2}$] вносятся в итоговую таблицу, в графы технического ветроэнергетического потенциала. Величина $\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}}$ указывается на карте ветроэнергетических ресурсов для основных характерных районов (метеостанции) региона.

2) Итоговая таблица ветроэнергетических ресурсов (ветроэнергетического потенциала) региона оформляется в указанном ниже виде (выполняется в пояснительной записке и на листе ватмана формата А2).

Ветроэнергетические ресурсы региона Ленинградской области, Северо-западный регион.

Наименование метеостанции (района)	Среднегодовая скорость ветра $u_{\text{год}}$ (м/с)	Природный ветроэнергетический потенциал N_e Вт/м ²	Технический ветроэнергетический потенциал (ВЭУ типа "MICON"; N = 400 кВт; D = 31 м; H = 36 м)			
			$K_{\text{исп.}}$	$T_{\text{исп.}}$	$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ млн.(кВт·ч)	$\frac{\mathcal{E}_{\text{техн.уд.}}}{\text{км}^2}$ млн.(кВт·ч)
Ломоносов	5,1	399	0,22	1940	0,77	8
...

В таблице указываются все рассмотренные метеостанции и районы региона.

Среднегодовая скорость ветра $u_{\text{год}}$ указывается на высоте флюгера метеостанции для условий открытой местности.

Природный ветроэнергетический потенциал (N_e) – на высоте 50м.

3) На основании сводной итоговой таблицы проводится анализ ветроэнергетических ресурсов региона.

На карте выделяются районы с более высокой среднегодовой скоростью ветра, более высоким ветропотенциалом. При этом на карте ресурсов проводятся соответствующие изолинии, ограничивающие районы с одинаковыми значениями $u_{\text{год}}$, N_e , $\mathcal{E}_{\text{техн. уд.}}$.

4) Для одного, наиболее перспективного района, как по ветроэнергетическому потенциалу, так и по народно-хозяйственной значимости, делается проектная оценка – предложение по проектированию ВЭС.

- назначается ориентировочно установленная мощность ВЭС $N_{\text{ВЭС}}$;
- на основе выбранного типа ВЭУ определяется количество ветроагрегатов и площадь территории, занимаемая ими;
- подсчитываются возможное годовое число часов использования установленной мощности ВЭС $T_{\text{исп.}}$;
- определяется возможная годовая выработка ВЭС $\mathcal{E}_{\text{ВЭС}}$;
- делается вывод об эффективности ВЭС.

Например:

Для г. Ломоносов (Северо-западный регион):

$$N_{\text{ВЭУ}} = 400 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{ВЭС}} = 40 \text{ МВт};$$

$$T_{\text{исп.}} = 1940 \text{ ч};$$

$$\mathcal{E}_{\text{ВЭС}} = 7,76 \text{ млн. (кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Количество ветроагрегатов типа “MICON” – 100 штук.

ВЭС может быть запроектирована на мелководной акватории Финского залива на Лондонской отмели. Площадь, занимаемая ВЭС ориентировочно составит 9,6 км².

Предлагаемая ВЭС указывается на карте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анапольская Л.Е., Режим скоростей ветра на территории СССР, Л., Гидрометеиздат, 1961.
2. Справочник по климату СССР, Ч III, Ветер, Л., Гидрометеиздат, 1996.
3. Шефтер Я.И., Использование энергии ветра, М., “Энергия”, 1983.
4. Сидоров В. И., Сидоров В. В., Кузнецов М. В., Об использовании ветроэнергетических ресурсов, Изв. АН СССР, “Энергетика и транспорт”. 1980, №3.
5. Энергия ветра, перевод с англ. под редакцией Шефтера Я.И., “Мир”, М., 1982.
6. Минин В.А., Ветроэнергетические ресурсы европейского Севера СССР, Аппатиты, КФ АН СССР, 1983.
7. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов, ГГО им. А.И. Войекова, Л., Гидрометеиздат, 1989.
8. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р., Использование энергии ветра в районах севера, Л., “Наука”, 1990.
9. Борисенко М. М., Семенова Н. С., Соколова С. Н., Об особенностях климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов в нижнем 500-метровом слое атмосферы ЕЧС, Труды ГГО им. А.И. Войекова, вып. 532, 1990.
10. Кузнецов М.В., О методике ветроэнергетических расчётов, “Электрические станции”, № 7, 1992.
11. Атласы ветрового и солнечного климатов России, ГГО им. А.И. Войекова, СПб., 1997.
12. Елистратов В.В., Перспективы использования возобновляемых источников энергии в XXI веке, Доклад на семинаре “Энергоэффективная экономика. Нетрадиционные системы энергообеспечения”, 30 октября-2 ноября, СПб., 2001.
13. Безруких П.П., Экономика и возможные масштабы развития нетрадиционных возобновляемых источников энергии, РАН, Институт народнохозяйственного прогнозирования, Доклад на семинаре, 26 марта, М., 2002.
14. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. Под ред. П.П.Безруких, С-Петербург, «Наука», 2002г., 314с.
15. Атлас ветров России. А.Н.Старков, Л.Линдберг, П.П.Безруких, М.М.Борисенко, М., Можайск-Терра, 2000, 560с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Повторяемость скоростей ветра по уравнениям Гриневича, %

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																					
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Первый тип распределения скоростей (побережье открытого моря , океана)																						
5,0	2	9,1	12	13,2	13,1	12	10,3	8,4	6,5	4,7	3,3	2,2	1,4	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1				
5,1	2	8,8	11,7	12,9	12,9	11,9	10,4	8,5	6,6	4,9	3,5	2,3	1,5	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1				
5,2	1,9	8,6	11,4	12,6	12,7	11,8	10,4	8,6	6,8	5,1	3,7	2,5	1,6	1	0,6	0,4	0,2	0,1				
5,3	1,9	8,3	11,1	12,4	12,5	11,7	10,3	8,7	6,9	5,3	3,8	2,7	1,8	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1			
5,4	1,8	8,1	10,8	12,1	12,3	11,6	10,3	8,7	7	5,4	4	2,8	1,9	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1			
5,5	1,7	7,9	10,6	11,8	12,1	11,5	10,3	8,8	7,2	5,6	4,1	3	2	1,4	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1			
5,6	1,7	7,7	10,3	11,6	11,9	11,3	10,2	8,8	7,3	5,7	4,3	3,1	2,2	1,5	1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1		
5,7	1,6	7,5	10,1	11,4	11,7	11,2	10,2	8,8	7,3	5,9	4,5	3,3	2,3	1,6	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1		
5,8	1,6	7,3	9,8	11,1	11,5	11,1	10,1	8,9	7,4	6	4,6	3,4	2,5	1,7	1,2	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1		
5,9	1,6	7,1	9,6	10,9	11,3	10,9	10,1	8,9	7,5	6,1	4,8	3,6	2,6	1,8	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	
6,0	1,5	7	9,4	10,7	11,1	10,8	10	8,9	7,6	6,2	4,9	3,7	2,7	1,9	1,3	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	
6,1	1,5	6,8	9,2	10,5	10,9	10,7	9,9	8,9	7,6	6,3	5	3,9	2,9	2,1	1,4	1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	
6,2	1,4	6,6	9	10,2	10,7	10,5	9,9	8,9	7,6	6,4	5,1	4	3	2,2	1,5	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
6,3	1,4	6,5	8,8	10	10,5	10,4	9,8	8,8	7,7	6,5	5,2	4,1	3,1	2,3	1,7	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
6,4	1,4	6,3	8,6	9,8	10,4	10,3	9,7	8,8	7,7	6,5	5,3	4,2	3,3	2,4	1,8	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1
6,5	1,3	6,2	8,4	9,7	10,2	10,1	9,6	8,8	7,7	6,6	5,4	4,3	3,4	2,5	1,9	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
6,6	1,3	6,1	8,2	9,5	10	10	9,5	8,8	7,8	6,6	5,5	4,4	3,5	2,6	2	1,4	1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2
6,7	1,3	5,9	8,1	9,3	9,9	9,9	9,5	8,7	7,8	6,7	5,6	4,5	3,6	2,7	2,1	1,5	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																				
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Первый тип распределения скоростей																						
6,8	1,2	5,8	7,9	9,1	9,7	9,7	9,4	8,7	7,8	6,7	5,7	4,6	3,7	2,9	2,2	1,6	1,1	0,8	0,5	0,4	0,2	0,3
6,9	1,2	5,7	7,7	8,9	9,5	9,6	9,3	8,6	7,8	6,8	5,7	4,7	3,8	3	2,3	1,7	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3	0,3
7,0	1,2	5,5	7,6	8,8	9,4	9,5	9,2	8,6	7,8	6,8	5,8	4,8	3,9	3,1	2,4	1,7	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,4
7,1	1,2	5,4	7,4	8,6	9,2	9,4	9,1	8,5	7,7	6,8	5,9	4,9	4	3,2	2,5	1,8	1,4	1	0,7	0,5	0,3	0,5
7,2	1,1	5,3	7,3	8,5	9,1	9,2	9	8,5	7,7	6,9	5,9	5	4,1	3,3	2,6	1,9	1,4	1	0,7	0,5	0,4	0,6
7,3	1,1	5,2	7,1	8,3	8,9	9,1	8,9	8,4	7,7	6,9	6	5,1	4,2	3,3	2,7	2	1,5	1,1	0,8	0,6	0,4	0,7
7,4	1,1	5,1	7	8,2	8,8	9	8,8	8,4	7,7	6,9	6	5,1	4,2	3,4	2,7	2,1	1,6	1,2	0,9	0,6	0,4	0,8
7,5	1	5	6,9	8	8,7	8,9	8,7	8,3	7,7	6,9	6	5,2	4,3	3,5	2,8	2,2	1,7	1,3	0,9	0,7	0,5	0,8
7,6	1	4,9	6,8	7,9	8,6	8,8	8,6	8,2	7,6	6,9	6,1	5,2	4,4	3,6	2,9	2,3	1,8	1,3	1	0,7	0,5	0,9
7,7	1	4,8	6,6	7,8	8,4	8,6	8,5	8,2	7,6	6,9	6,1	5,3	4,5	3,7	3	2,4	1,8	1,4	1	0,8	0,5	1,1
7,8	1	4,7	6,5	7,7	8,3	8,5	8,4	8,1	7,6	6,9	6,1	5,3	4,5	3,8	3,1	2,4	1,9	1,5	1,1	0,8	0,6	1,2
7,9	0,9	4,6	6,4	7,6	8,2	8,4	8,4	8	7,5	6,9	6,2	5,4	4,6	3,8	3,1	2,5	2	1,5	1,2	0,9	0,6	1,3
8,0	0,9	4,6	6,3	7,4	8	8,3	8,3	8	7,5	6,9	6,2	5,4	4,6	3,9	3,2	2,6	2,1	1,6	1,2	0,9	0,7	1,4
8,1	0,9	4,5	6,2	7,2	7,9	8,2	8,2	7,9	7,5	6,9	6,2	5,4	4,7	3,9	3,3	2,7	2,1	1,7	1,3	1	0,7	1,6
8,2	0,9	4,4	6,1	7,1	7,8	8,1	8,1	7,9	7,4	6,9	6,2	5,5	4,7	4	3,4	2,7	2,2	1,7	1,3	1	0,8	1,8
8,3	0,9	4,3	6	7	7,6	8	8	7,8	7,4	6,8	6,2	5,5	4,8	4,1	3,4	2,8	2,3	1,8	1,4	1,1	0,8	2
8,4	0,9	4,3	5,8	6,9	7,5	7,9	7,9	7,7	7,3	6,8	6,2	5,5	4,8	4,2	3,5	2,9	2,3	1,9	1,5	1,1	0,9	2,2
8,5	0,8	4,2	5,7	6,8	7,4	7,8	7,8	7,6	7,3	6,8	6,2	5,6	4,9	4,2	3,6	3	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	2,4
8,6	0,8	4,1	5,7	6,7	7,3	7,6	7,7	7,6	7,3	6,8	6,2	5,6	4,9	4,3	3,6	3	2,5	2	1,6	1,2	1	2,5
8,7	0,8	4	5,6	6,6	7,2	7,5	7,7	7,5	7,2	6,8	6,2	5,6	4,9	4,3	3,7	3,1	2,5	2,1	1,7	1,3	1	2,7
8,8	0,8	3,9	5,5	6,5	7,1	7,5	7,6	7,5	7,2	6,7	6,2	5,6	5	4,3	3,7	3,1	2,6	2,1	1,7	1,4	1,1	2,9
8,9	0,8	3,9	5,4	6,4	7	7,4	7,5	7,4	7,1	6,7	6,2	5,6	5	4,4	3,8	3,2	2,6	2,2	1,8	1,4	1,1	3,1

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																				
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Первый тип распределения скоростей																						
9,0	0,7	3,8	5,3	6,3	6,9	7,3	7,4	7,3	7,1	6,7	6,2	5,6	5	4,4	3,8	3,3	2,7	2,3	1,8	1,5	1,2	3,4
9,1	0,7	3,8	5,2	6,2	6,8	7,2	7,3	7,2	7	6,6	6,2	5,6	5,1	4,5	3,9	3,3	2,8	2,3	1,9	1,5	1,2	3,7
9,2	0,7	3,7	5,1	6,1	6,7	7,1	7,2	7,2	7	6,6	6,2	5,6	5,1	4,5	3,9	3,4	2,8	2,4	1,9	1,6	1,3	3,9
9,3	0,7	3,6	5	6	6,6	7	7,2	7,1	6,9	6,6	6,2	5,6	5,1	4,6	4	3,5	2,9	2,4	2	1,6	1,3	4,1
9,4	0,7	3,6	5	5,9	6,5	6,9	7,1	7	6,9	6,5	6,1	5,6	5,1	4,6	4	3,5	3	2,5	2,1	1,7	1,4	4,3
9,5	0,7	3,5	4,9	5,8	6,4	6,8	7	7	6,8	6,5	6,1	5,6	5,1	4,6	4	3,6	3,1	2,6	2,2	1,7	1,4	4,6
9,6	0,7	3,5	4,8	5,7	6,3	6,7	6,9	6,9	6,8	6,5	6,1	5,6	5,1	4,6	4,1	3,6	3,1	2,6	2,2	1,8	1,5	4,9
9,7	0,6	3,4	4,7	5,6	6,3	6,6	6,9	6,9	6,7	6,4	6,1	5,6	5,2	4,7	4,1	3,6	3,1	2,7	2,3	1,8	1,5	5,2
9,8	0,6	3,4	4,7	5,6	6,2	6,5	6,8	6,8	6,6	6,4	6,1	5,6	5,2	4,7	4,1	3,6	3,1	2,7	2,3	1,9	1,5	5,6
9,9	0,6	3,3	4,6	5,5	6,1	6,5	6,7	6,7	6,6	6,4	6	5,6	5,2	4,7	4,2	3,7	3,2	2,7	2,3	1,9	1,6	5,9
10,0	0,6	3,3	4,6	5,4	6	6,4	6,6	6,7	6,5	6,3	6	5,6	5,2	4,7	4,2	3,7	3,2	2,8	2,4	2	1,6	6,2
10,1	0,6	3,2	4,5	5,4	6	6,3	6,5	6,6	6,5	6,3	6	5,6	5,2	4,7	4,2	3,7	3,3	2,9	2,4	2	1,7	6,5
10,2	0,6	3,2	4,4	5,3	5,9	6,2	6,5	6,5	6,4	6,2	6	5,6	5,2	4,7	4,2	3,8	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7	6,8
10,3	0,6	3,1	4,4	5,2	5,8	6,2	6,4	6,5	6,3	6,2	5,9	5,6	5,2	4,7	4,3	3,8	3,4	2,9	2,5	2,1	1,8	7,1
10,4	0,6	3,1	4,3	5,1	5,7	6,1	6,3	6,4	6,3	6,2	5,9	5,6	5,2	4,7	4,3	3,8	3,4	3	2,6	2,2	1,8	7,4
10,5	0,6	3	4,2	5,1	5,6	6	6,3	6,3	6,3	6,1	5,9	5,6	5,2	4,8	4,3	3,9	3,4	3	2,6	2,2	1,9	7,7
10,6	0,5	3	4,2	5	5,6	6	6,2	6,3	6,2	6,1	5,8	5,5	5,2	4,8	4,3	3,9	3,5	3	2,6	2,3	1,9	8,1
10,7	0,5	3	4,1	4,9	5,5	5,9	6,1	6,2	6,2	6	5,8	5,5	5,2	4,8	4,4	3,9	3,5	3,1	2,7	2,3	2	8,4
10,8	0,5	2,9	4,1	4,9	5,4	5,8	6,1	6,2	6,1	6	5,8	5,5	5,2	4,8	4,4	3,9	3,5	3,1	2,7	2,3	2	8,8
10,9	0,5	2,9	4	4,8	5,3	5,7	6	6,1	6,1	6	5,8	5,5	5,1	4,8	4,4	3,9	3,6	3,1	2,8	2,4	2	9,1
11,0	0,5	2,8	4	4,7	5,3	5,7	5,9	6,1	6	5,9	5,7	5,5	5,1	4,8	4,4	4	3,6	3,2	2,8	2,4	2,1	9,5
11,1	0,5	2,8	3,9	4,7	5,2	5,6	5,9	6	6	5,9	5,7	5,4	5,1	4,8	4,4	4	3,6	3,2	2,8	2,5	2,1	9,9

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																				
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Первый тип распределения скоростей																						
11,2	0,5	2,8	3,8	4,6	5,2	5,6	5,8	6	5,9	5,8	5,7	5,4	5,1	4,8	4,4	4	3,6	3,2	2,9	2,5	2,2	10,2
11,3	0,5	2,7	3,8	4,6	5,1	5,5	5,7	5,9	5,9	5,8	5,6	5,4	5,1	4,8	4,4	4	3,7	3,3	2,9	2,5	2,2	10,6
11,4	0,5	2,7	3,8	4,5	5	5,4	5,7	5,8	5,8	5,7	5,6	5,4	5,1	4,8	4,4	4	3,7	3,3	2,9	2,6	2,2	11
11,5	0,5	2,7	3,7	4,4	5	5,3	5,6	5,7	5,8	5,7	5,6	5,3	5,1	4,8	4,4	4,1	3,7	3,3	3	2,6	2,3	11,4
11,6	0,5	2,6	3,7	4,4	4,9	5,3	5,6	5,7	5,7	5,7	5,5	5,3	5,1	4,8	4,4	4,1	3,7	3,3	3	2,6	2,3	11,8
11,7	0,4	2,6	3,6	4,3	4,9	5,2	5,5	5,6	5,7	5,6	5,5	5,3	5,1	4,8	4,4	4,1	3,7	3,4	3	2,7	2,3	12,3
11,8	0,4	2,5	3,6	4,3	4,8	5,2	5,4	5,6	5,6	5,6	5,5	5,3	5	4,7	4,4	4,1	3,7	3,4	3	2,7	2,4	12,8
11,9	0,4	2,5	3,5	4,2	4,8	5,1	5,4	5,5	5,6	5,5	5,4	5,3	5	4,7	4,4	4,1	3,8	3,4	3,1	2,7	2,4	13,2
12,0	0,4	2,5	3,5	4,2	4,7	5,1	5,3	5,5	5,5	5,5	5,4	5,2	5	4,7	4,4	4,1	3,8	3,4	3,1	2,7	2,4	13,6

Второй тип распределения скоростей (прибрежная зона)																						
3,0	7,4	20,0	20,1	17,4	13,4	9,3	5,9	3,4	1,7	0,8	0,4	0,1	0,1									
3,1	7,2	19,3	19,5	17,1	13,5	9,6	6,3	3,7	2	1	0,5	0,2	0,1									
3,2	6,8	18,7	19	16,9	13,5	9,9	6,6	4,1	2,3	1,2	0,6	0,3	0,1									
3,3	6,6	18,0	18,5	16,6	13,6	10,1	6,9	4,4	2,6	1,4	0,7	0,3	0,2	0,1								
3,4	6,4	17,4	18,0	16,4	13,5	10,3	7,3	4,7	2,9	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1								
3,5	6,2	16,9	17,5	16,1	13,5	10,5	7,5	5,0	3,1	1,8	1,0	0,5	0,3	0,1								
3,6	6,0	16,3	17,1	15,8	13,4	10,6	7,8	5,3	3,4	2,0	1,1	0,6	0,3	0,2	0,1							
3,7	5,8	15,8	16,6	15,5	13,3	10,7	8,0	5,6	3,7	2,3	1,3	0,7	0,4	0,2	0,1							
3,8	5,6	15,4	16,2	15,3	13,3	10,8	8,2	5,8	3,9	2,5	1,5	0,8	0,4	0,2	0,1							
3,9	5,4	14,9	15,8	15,0	13,2	10,8	8,3	6,0	4,2	2,7	1,7	1,0	0,5	0,3	0,1	0,1						
4,0	5,3	14,5	15,4	14,7	13,0	10,8	8,5	6,3	4,4	2,9	1,9	1,1	0,6	0,3	0,2	0,1						
4,1	5,2	14,1	15,0	14,4	12,9	10,8	8,6	6,5	4,6	3,1	2,1	1,2	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1					

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																				
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Второй тип распределения скоростей																						
4,2	5,0	13,7	14,7	14,2	12,8	10,8	8,7	6,6	4,8	3,3	2,2	1,4	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1					
4,3	4,9	13,4	14,3	13,9	12,7	10,8	8,8	6,8	5,0	3,5	2,4	1,5	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1					
4,4	4,8	13,0	14,0	13,6	12,5	10,8	8,8	7,0	5,2	3,7	2,6	1,6	1,0	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1				
4,5	4,7	12,6	13,7	13,4	12,3	10,8	8,9	7,1	5,4	3,9	2,7	1,8	1,2	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1				
4,6	4,5	12,3	13,4	13,2	12,1	10,7	8,9	7,2	5,5	4,1	2,9	2,0	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1				
4,7	4,4	12,0	13,1	12,9	12,0	10,6	9,0	7,3	5,7	4,3	3,0	2,1	1,4	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1			
4,8	4,3	11,7	12,8	12,7	11,9	10,6	9,0	7,4	5,8	4,4	3,2	2,3	1,5	1,0	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1			
4,9	4,2	11,4	12,5	12,4	11,7	10,5	9,0	7,5	5,9	4,6	3,4	2,4	1,7	1,1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1			
5,0	4,1	11,2	12,3	12,2	11,5	10,4	9,0	7,5	6,1	4,7	3,5	2,5	1,8	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1		
5,1	4,0	10,9	12,0	12,0	11,4	10,3	9,0	7,6	6,2	4,8	3,7	2,7	1,9	1,3	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1		
5,2	3,9	10,7	11,8	11,8	11,2	10,3	9,0	7,6	6,3	5,0	3,8	2,8	2,0	1,4	1,0	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1		
5,3	3,8	10,4	11,5	11,6	11,1	10,2	9,0	7,7	6,3	5,1	3,9	2,9	2,2	1,5	1,0	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	
5,4	3,7	10,2	11,2	11,4	10,9	10,1	9,0	7,7	6,4	5,2	4,1	3,1	2,3	1,6	1,1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	
5,5	3,7	10,0	11,0	11,2	10,8	10,0	8,9	7,7	6,5	5,3	4,2	3,2	2,4	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	
5,6	3,6	9,8	10,8	11,0	10,6	9,9	8,9	7,7	6,5	5,4	4,3	3,3	2,5	1,8	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1
5,7	3,5	9,6	10,6	10,8	10,5	9,8	8,8	7,7	6,6	5,5	4,4	3,4	2,6	1,9	1,4	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
5,8	3,5	9,4	10,4	10,6	10,4	9,7	8,8	7,7	6,7	5,6	4,5	3,5	2,7	2,0	1,5	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
5,9	3,4	9,2	10,2	10,5	10,2	9,6	8,7	7,7	6,7	5,6	4,6	3,6	2,8	2,1	1,6	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2
6,0	3,4	9,0	10,0	10,3	10	9,5	8,7	7,7	6,7	5,7	4,7	3,7	2,9	2,2	1,7	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
6,1	3,3	8,9	9,8	10,1	9,9	9,4	8,6	7,7	6,7	5,7	4,7-	3,8	3,0	2,3	1,8	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,3
6,2	3,3	8,7	9,7	9,9	9,8	9,3	8,6	7,7	6,7	5,8	4,8	3,9	3,1	2,4	1,9	1,4	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,3
6,3	3,2	8,5	9,5	9,8	9,6	9,2	8,5	7,7	6,8	5,8	4,9	4,0	3,2	2,5	1,9	1,4	1,1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,4

Средняя скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с																				
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Второй тип распределения скоростей																						
6,4	3,1	8,4	9,3	9,6	9,5	9,1	8,4	7,7	6,8	5,9	5,0	4,1	3,3	2,6	2,0	1,5	1,1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,5
6,5	3,0	8,2	9,2	9,5	9,4	9,0	8,4	7,6	6,8	5,9	5,0	4,2	3,4	2,7	2,1	1,6	1,2	0,9	0,6	0,5	0,3	0,5
6,6	3,0	8,1	9	9,3	9,2	8,9	8,3	7,6	6,8	5,9	5,1	4,2	3,5	2,8	2,2	1,7	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,6
6,7	2,9	7,9	8,9	9,2	9,1	8,8	8,3	7,6	6,8	5,9	5,1	4,3	3,6	2,9	2,3	1,8	1,3	1,0	0,7	0,5	0,4	0,7
6,8	2,9	7,8	8,7	9	9	8,7	8,2	7,5	6,8	6	5,2	4,4	3,6	3,0	2,3	1,8	1,4	1,1	0,8	0,6	0,4	0,8
6,9	2,8	7,7	8,6	8,9	8,9	8,6	8,1	7,5	6,8	6	5,2	4,4	3,7	3,0	2,4	1,9	1,5	1,1	0,9	0,6	0,5	0,9
7,0	2,8	7,5	8,4	8,8	8,8	8,5	8,0	7,4	6,8	6	5,2	4,5	3,8	3,1	2,5	2	1,6	1,2	0,9	0,7	0,5	1,0
7,1	2,8	7,4	8,3	8,6	8,6	8,4	8,0	7,4	6,7	6	5,3	4,5	3,8	3,2	2,6	2,1	1,6	1,3	1	0,7	0,5	1,2
7,2	2,7	7,3	8,2	8,5	8,5	8,3	7,9	7,4	6,7	6	5,3	4,6	3,9	3,2	2,7	2,1	1,7	1,3	1	0,8	0,6	1,3
7,3	2,7	7,2	8,1	8,4	8,4	8,2	7,8	7,3	6,7	6	5,3	4,6	3,9	3,3	2,7	2,2	1,8	1,4	1,1	0,8	0,6	1,5
7,4	2,7	7	7,9	8,3	8,3	8,1	7,8	7,3	6,7	6	5,3	4,6	4	3,3	2,8	2,3	1,8	1,5	1,1	0,9	0,7	1,6
7,5	2,6	6,9	7,8	8,2	8,2	8,0	7,7	7,2	6,7	6	5,4	4,7	4	3,4	2,9	2,4	1,9	1,5	1,2	0,9	0,7	1,7
7,6	2,6	6,8	7,7	8	8,1	8,0	7,6	7,2	6,6	6	5,4	4,7	4,1	3,5	2,9	2,4	2	1,6	1,2	1	0,7	1,9
7,7	2,6	6,7	7,6	7,9	8	7,9	7,6	7,1	6,6	6	5,4	4,8	4,1	3,5	3	2,5	2	1,6	1,3	1	0,8	2
7,8	2,5	6,6	7,5	7,8	7,9	7,8	7,5	7,1	6,6	6	5,4	4,8	4,1	3,6	3	2,5	2,1	1,7	1,4	1,1	0,8	2,2
7,9	2,5	6,5	7,4	7,7	7,8	7,7	7,5	7	6,5	6	5,4	4,8	4,2	3,6	3,1	2,6	2,1	1,8	1,4	1,1	0,9	2,4
8,0	2,5	6,4	7,3	7,6	7,7	7,6	7,4	7	6,5	6	5,4	4,8	4,2	3,7	3,1	2,6	2,2	1,8	1,5	1,2	0,9	2,6
8,1	2,5	6,3	7,1	7,5	7,6	7,5	7,3	6,9	6,5	6	5,4	4,8	4,3	3,7	3,2	2,7	2,3	1,9	1,5	1,2	1	2,8
8,2	2,4	6,2	7	7,4	7,5	7,4	7,2	6,9	6,5	6	5,4	4,8	4,3	3,8	3,2	2,8	2,3	1,9	1,6	1,3	1	3,1
8,3	2,4	6,1	6,9	7,3	7,4	7,3	7,2	6,8	6,4	5,9	5,4	4,9	4,3	3,8	3,3	2,8	2,4	2	1,6	1,3	1,1	3,4
8,4	2,4	6,1	6,8	7,2	7,3	7,3	7,1	6,8	6,4	5,9	5,4	4,9	4,3	3,8	3,3	2,9	2,4	2	1,7	1,4	1,1	3,5
8,5	2,4	6	6,8	7,1	7,2	7,2	7	6,7	6,3	5,9	5,4	4,9	4,4	3,9	3,4	2,9	2,5	2,1	1,7	1,4	1,1	3,7

Таблица 9.

Гамма-функция

у	Г(у)	у	Г(у)	у	Г(у)	у	Г(у)
1,00	1,00000	1,26	0,90440	1,52	0,88704	1,78	0,92623
1,01	0,99433	1,27	0,90250	1,53	0,88757	1,79	0,92877
1,02	0,98884	1,28	0,90020	1,54	0,88818	1,80	0,93138
1,03	0,98355	1,29	0,89904	1,55	0,88887	1,81	0,93408
1,04	0,97844	1,30	0,89747	1,56	0,88964	1,82	0,93685
1,05	0,97350	1,31	0,89600	1,57	0,89049	1,83	0,93969
1,06	0,96874	1,32	0,89464	1,58	0,89142	1,84	0,94261
1,07	0,96415	1,33	0,89338	1,59	0,89243	1,85	0,94561
1,08	0,95973	1,34	0,89222	1,60	0,89352	1,86	0,94869
1,09	0,95546	1,35	0,89115	1,61	0,89468	1,87	0,95184
1,10	0,95135	1,36	0,89018	1,62	0,89592	1,88	0,95507
1,11	0,94740	1,37	0,88931	1,63	0,89724	1,89	0,95838
1,12	0,94359	1,38	0,88854	1,64	0,89864	1,90	0,96177
1,13	0,93993	1,39	0,88785	1,65	0,90012	1,91	0,96523
1,14	0,93642	1,40	0,88726	1,66	0,90167	1,92	0,96877
1,15	0,93304	1,41	0,88676	1,67	0,90330	1,93	0,97240
1,16	0,92980	1,42	0,88636	1,68	0,90500	1,94	0,97610
1,17	0,92670	1,43	0,88604	1,69	0,90688	1,95	0,97988
1,18	0,92373	1,44	0,88581	1,70	0,90864	1,96	0,98374
1,19	0,92089	1,45	0,88566	1,71	0,91057	1,97	0,98768
1,20	0,91817	1,46	0,88560	1,72	0,91258	1,98	0,99171
1,21	0,91558	1,47	0,88563	1,73	0,91467	1,99	0,99581
1,22	0,91311	1,48	0,88575	1,74	0,91683	2,00	1,00000
1,23	0,91075	1,49	0,88595	1,75	0,91906		
1,24	0,90852	1,50	0,88623	1,76	0,92137		
1,25	0,90640	1,51	0,88659	1,77	0,92376		

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Современная ветроэнергетика, ветроэнергетические ресурсы	5
1.1. Современные ветроэнергетические установки и ветроэлектрические станции	8
1.2. Виды ветроэнергетических ресурсов, их общая оценка	8
2. Основные понятия, определения и терминология, используемые в практике ветроэнергетических расчетов	15
2.1. Ветроэнергетический кадастр	27
2.2. Роза ветров, повторяемость ветра по направлениям, класс открытости станций	20
2.3. Об изменении скорости ветра с высотой	27
2.4. Вероятность скорости ветра по градациям, интегральная и дифференциальная повторяемости скорости ветра	28
2.5. Математические функции распределения скорости ветра	31
2.6. Мощность ветрового потока, коэффициент использования установленной мощности ВЭУ, плотность технического ветропотенциала	35
3. Последовательность и порядок выполнения курсовой работы по определению ветроэнергетических ресурсов региона	41
3.1. Комплекс вопросов, подлежащих разработке	41
3.2. Краткая характеристика региона и анализ ветрового кадастра	41
3.3. Порядок расчета по определению природного ветроэнергетического потенциала	42
3.4. Порядок расчета по определению технического ветроэнергетического потенциала	43
3.5. Выводы по расчетам и анализу ветроэнергетических ресурсов региона	45
Литература	48
Приложение	49