ДОКЛАД

по диссертационной работе на соискание ученой степени доктора технических наук

«МЕТОДОЛОГИЯ РЕСУРСНОГО И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК»

НИКОЛАЕВ Владимир Геннадьевич, к. ф.-м. н.

директор научно-информационного Центра «АТМОГРАФ», Москва, Россия

Тел./факс: 8-499-744-41-63, E-mail: atmograph@gmail.com

Слайд 1

Моделирование мощности ВЭС $P_{ВЭС}$ в заданном месте / районе территории России и стран СНГ по методике НИЦ “АТМОГРАФ”

$$P_{ВЭС} = K_{ТГ}(n) \cdot K(V)_{НИД} \cdot (\rho/\rho_o) \cdot \int_{S_{ВК}} \cdot \int_{V_o}^{V_{БУР}} p(V) \cdot f(V)\, dV = K_{ТГ}(n) \cdot K(V)_{НИД} \cdot \sum_{i=1}^{N} p(V_i) \cdot G(V_i)$$

где $K_{ТГ}(n)$, модель коэффициента технической готовности ВЭС (переменного по годам, n – номер года работы ВЭУ), $K_{ТГ}(n)$ – **функция** технических простоев

$K(V)_{НИД}$ – коэффициент неидеальности работы ВЭС, $K(V)_{НИД}$ – **функция** характеристик ветра и технических параметров ВЭУ

(ρ/ρ_o) – параметр плотности (отношение реальной плотности к стандартной)

$p(V)$ – мощностная характеристика ВЭУ, $p(V)$ – нелинейная функция скорости ветра и технических параметров ВЭУ

$G(V)$ – табулированная функция плотности вероятности распределения скорости ветра по ее градациям на высоте оси ветроколеса ВЭУ $H_{ВК}$.

$f(V)$ – функция плотности вероятности распределения скорости ветра – аналитическая функция аппроксимирующая $\omega(V_i)$ на высоте оси ВК

Слайд 2

Глава 2. Методика моделирования вероятности технических простоев $P_{тп}(n)$ и технической надежности ВЭС $K_{тг}(n)$

Согласно анализу эксплуатационных показателей ВЭУ Av_6, Av_{10} и сроков капремонта, ВЭУ – "стареющие" технические объекты с растущей с годами $P_{тп}$. Модели $P_{тп}$ "стареющих" ВЭУ построены автором на базе растущих со временем с ускорением функций (степенных вида $P_{тп}(n)=a\cdot n^b$ **(2.7)** либо экспоненциальных вида $P_{тп}(n)=\lambda\cdot exp(\omega\cdot n)$ **(2.8)**. Дополнительные ограничения на функции **(2.7)** и **(2.8)** вытекают из условия $P_{тп}<1$ на протяжении всего ресурса ВЭУ: $F(n)<F(20)\leq 1$ **(2.9)** и из данных о $P_{тп}$ из-за регламентных работ: $P_{тп}(n)\geq 0{,}005$ **(2.10)**. Анализ проведен в предположении о линейной связи $P_{тп}$ на 1-м году работы и P_{10} (средней $P_{тп}$ за первые 10 лет) со значением $P(6)$ на 6-м году: $P_{тп}(1)=m\cdot P_{тп}(6)=m\cdot(1-Av_6)$ **(2.11)** и $P_{тп.10}=k\cdot P_{тп}(6)=m\cdot(1-Av_6)=0{,}1\cdot\int P_{тп}(n)\cdot dn$ **(2.12)**, приводящих с учетом **(2.7)** и **(2.8)** к характеристическим трансцендентным ур-ям: $10^{b+1}-2^{b+1}+6^b\cdot(b+1)\cdot(m-10\cdot k)=0$ **(2.13)** и $e^{10\cdot\omega}-e^{2\cdot\omega}+\omega\cdot e^{6\cdot\omega}\cdot(m-10\cdot k)=0$ **(2.14)** относительно неизвестных b, k, m и ω, k, m. Из численного анализа ур-ний **(2.13)** и **(2.14)** =>удовлетворить условиям **(2.9)–(2.12)** можно лишь в классе экспоненциальн. функций **(2.8)** в диапазонах ω, k, m, λ, данных в табл.2.1

Таблица 2.1. **Параметры модели вероятности технических простоев ВЭУ.**

	ω		λ		k		m		Av_{10}	
	ω_{min}	ω_{max}	λ_{min}	λ_{max}	k_{min}	k_{max}	m_{min}	m_{max}	$Av_{10\ min}$	$Av_{10\ max}$
$Av_6 = 0{,}94$	0,159	0,195	0,01862	0,02311	1,038	1,066	1,826	1,827	0,930	0,936
$Av_6 = 0{,}96$	0,213	0,229	0,01012	0,01114	1,084	1,100	1,831	1,832	0,953	0,956
$Av_6 = 0{,}98$	0,233	0,273	0,00389	0,00494	1,105	1,152	1,839	1,840	0,974	0,977

Слайд 3

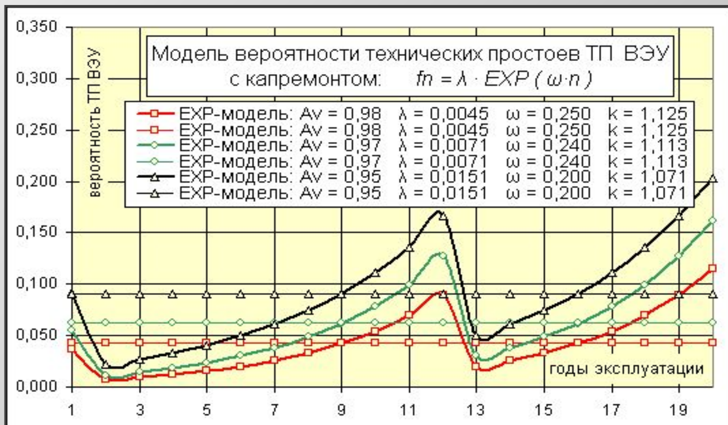
Прогноз технических и энергетических показателей ВЭС

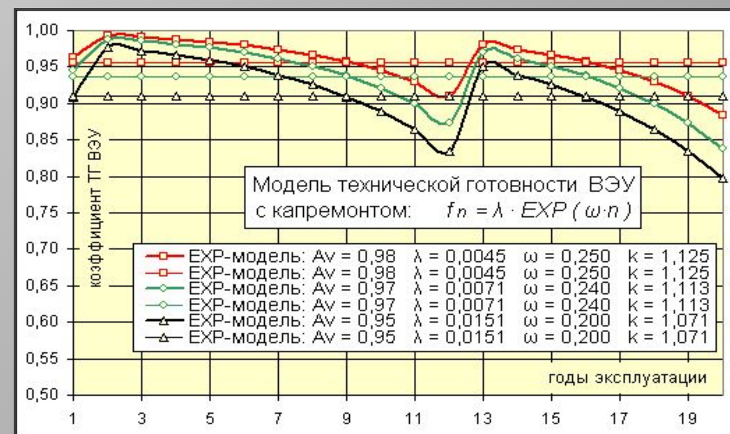
$К_{ТГ}$ – функция технической готовности ВЭУ (availability) (определяется техническим совершенством ВЭУ и ремонтной базой – **слабое место России !**)

Разработанная модель техн. готовности определяет многолетний ход $К_{ТГ}$:

$К_{ТГ}$ = 0,96 – 0,98 на 6-ой год ***0,85 – 0,90*** на 20-ый год ***средний $К_{ТГ}$ ≈ 0,95 – 0,92***

Диапазон возможных значений вероятности технических простоев ВЭУ





Технические простои ВЭУ при *Av_6 = 0,95 ; 0,97 и 0,98*

Диапазон $К_{ТГ}$ ВЭУ при Av_6 = 0,95, 0,97 и 0,98

Таблица 2.2. **Параметры моделей технической готовности ВЭУ с капремонтом**

	ω_{CP}	λ_{CP}	k_{CP}	m_{CP}	$Av_{CP\ 1}$	$Av_{CP\ 10}$	$Av_{CP\ 12}$	$Av_{CP\ 20}$	$Av_{CP\ 1-20}$
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1,827	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Av_6 = 0,96	0,221	0,01063	1,092	1,832	0,927	0,955	0,849	0,115	0,922
Av_6 = 0,98	0,253	0,00441	1,129	1,840	0,963	0,976	0,912	0,358	0,956

Таблица 2.4. **Многолетний ход среднегодовых *Эз* на ВЭУ разных поколений (в % от *Кз*).**

Тип ВЭУ \ Годы эксплуатации :	1 – 2	3 – 5	6 – 10	11 – 15	16 – 20
ВЭУ 150 кВт в ЕС	1,2	2,8	3,3	6,1	7,0
ВЭУ 300 кВт в ЕС	1,0	2,2	2,6	4,0	6,0
ВЭУ 600 кВт в ЕС	1,0	1,9	2,2	3,5	4,5
ВЭУ 600 кВт в ЕС		***1,88 – 1,92***	***2,11 – 2,26***	***4,21 – 4,73***	***4,42 – 5,09***

Прогноз технических и энергетических показателей ВЭС

Располагаемая мощность ВЭУ : $$P_{ВЭУ} = K_{НИД}(V) \cdot K_{РЕМ} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{V_o}^{S_{ВК}} \int_{V_{MAX}} p(V) \cdot f(V)\, dV = K_{НИД}(V) \cdot K_{ТГ} \cdot \sum_{i=1}^{N} p(V_i) \cdot f(V_i)$$

$K_{НИД}$ – **функция** $V(H)$ **и** $V(\varphi)$, **затенения, инерционности системы ориентации, потребления электроэнергии самой ВЭС и потерь в ее сетях**

Таблица 2.5. **Суммарное уменьшение выработки ВЭС при действии всех факторов**

Факторы снижения мощности ВЭУ в реальных условиях	Максимум	Минимум	Среднее
Нелинейность высотного профиля скорости ветра	0,98	0,99	0,985
Высотный сдвиг направления ветра	0,98	0,99	0,985
Временная изменчивость направления ветра	0,97	0,99	0,98
Завышение расчетных мощностных характеристик ВЭУ $P(V)$	0,93	0,97	0,950
Собственное энергопотребление ВЭУ	0,97	0,995	0,983
Потери во внутренних сетях ВЭС	0,97	0,985	0,978
Затенение ВЭУ друг другом	0,95	0,97	0,960
Затенение ВЭУ окружающими объектами	0,98	0,99	0,985
Уменьшение ресурса при повышенной турбулентности	0,95	1,00	0,980
Суммарный эффект	0,721	0,886	0,804

Исследование влияния на $P_{ВЭУ}$ высотного сдвига скорости ветра $V(h)$ в ПСА

Таблица 2.6. **Связь мощности ВЭУ с диаметром ВК и высотой башни для разных профилей** $V(h)$

$V_{фл}$, м	V_{100},	Диаметр ветроколеса 60 м				Диаметр ветроколеса 80 м				Диаметр ветроколеса 100 м				
		$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м	$h_{вк}$, м
		40	50	60	70	60	70	80	90	70	80	90	100	110
4,0	8,0	0,960	0,975	0,983	0,987	0,975	0,982	0,986	0,989	0,975	0,982	0,986	0,988	0,990
5,0	8,0	0,979	0,987	0,991	0,993	0,987	0,990	0,992	0,994	0,986	0,990	0,992	0,993	0,994
6,0	8,0	0,995	0,997	0,998	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,998	0,998	0,999
7,0	8,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Прогноз технических и энергетических показателей ВЭС

Располагаемая мощность ВЭУ : $$P_{ВЭУ} = K_{НИД} \cdot K_{РЕМ} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{V_0}^{S_{ВК}\,V_{MAX}} \int p(V) \cdot f(V)\, dV = K_{НИД} \cdot K_{ТГ} \cdot \sum_{i=1}^{N} p(V_i) \cdot f(V_i)$$

$K_{НИД}$ – **функция *V(H)* и *V(φ)*, затенения, плотности, инерционности системы ориентации, потребления электроэнергии самой ВЭС и потерь в ее сетях**

Исследование влияния на $P_{ВЭУ}$ высотного сдвига направления ветра *φ(h)* в ПСА с использованием модели *φ(h)*: $\varphi(h=\varphi_o \cdot \{exp\,[-(h/h_{вк}-1)]-1\}/(exp(1)-1)$ **(2.2).**

Таблица 2.7. **Зависимость изменений мощности ВЭУ от высотных сдвигов направления ветра**

φ_o,°	Диаметр ветроколеса 60 м				Диаметр ветроколеса 80 м					Диаметр ветроколеса 100 м				
	Высота оси ветроколеса, м				Высота оси ветроколеса, м					Высота оси ветроколеса, м				
	40	50	60	70	60	70	80	90	100	70	80	90	100	110
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
20	0,987	0,993	0,995	0,997	0,991	0,994	0,995	0,996	0,997	0,990	0,993	0,994	0,995	0,996
40	0,952	0,971	0,981	0,986	0,965	0,975	0,982	0,986	0,989	0,961	0,971	0,977	0,982	0,985
60	0,900	0,938	0,958	0,970	0,926	0,946	0,960	0,969	0,975	0,916	0,937	0,951	0,961	0,968

Таблица 2.8. **Относительное уменьшение мощности ВЭС от расстояния между ВЭУ**

Число диаметров ВК *n* :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{ВЭУ} / P^o_{ВЭУ}$:	0,595	0,782	0,851	0,893	0,922	0,938	0,949	0,958	0,966	0,972

Определение энергетической эффективности ВЭС

Располагаемая мощность ВЭУ : $P_{ВЭУ} = K_{НИД} \cdot K_{РЕМ} \cdot (\rho/\rho_o) \cdot \int_{V_o}^{V_{MAX}} p(V) \cdot f(V)\, dV = K_{НИД} \cdot K_{ТГ} \cdot \sum_{i=1}^{N} p(V_i) \cdot f(V_i)$ ($S_{ВК}$)

p (V) – рабочая характеристика **ВЭУ (рис.2) – функция аэродинамической эффективности (коэффициента использования удельной мощности ветра – ζ или Ср-фактора ζ = 0,47–0,5 для современных ВЭУ (рис.1).**

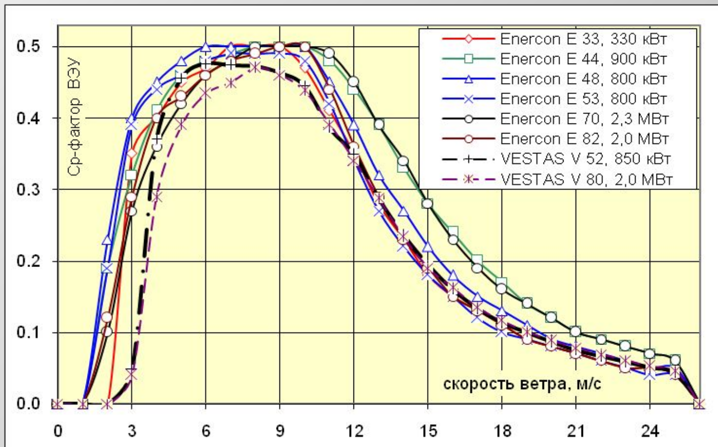
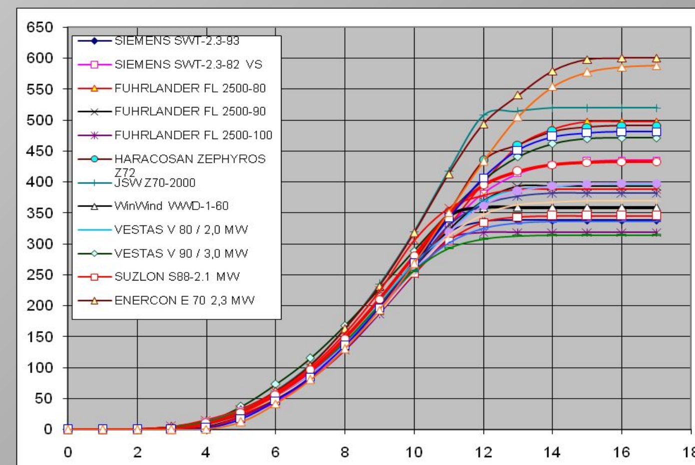
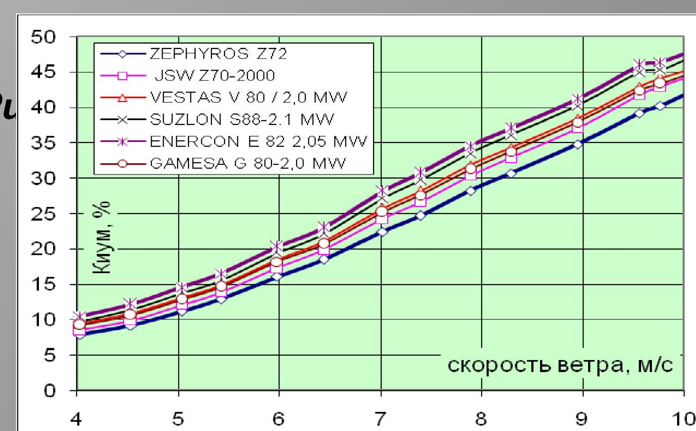


Рис. 1. *Ср-фактор современных ВЭУ*



Ри ²)



Оптимизация выбора энергетически и экономически эффективных ВЭУ для данных ветровых условий в методике автора достигается численным сравнительным анализом по параметру $K_{ИУМ}$ всех возможных базовых ВЭУ с использованием компьютерной БД "Эргомаш", содержащей рабочие и технические характеристики большинства известных серийно производимых ВЭУ (рис.3)

Глава 2. Основные результаты и выводы моделирования технических и энергетических показателей ВЭС :

- Моделированием вероятности и длительности среднегодовых технических простоев и технической готовности ВЭС последних поколений мегаваттной мощности установлено существенное (на 10–15%) уменьшение годовой выработки ВЭС из-за ремонтных простоев по мере выработки их ресурса, выявлены факторы “старения” ВЭУ и обоснована необходимость его учета для достоверного прогноза технико-экономических показателей ВЭС и их экономического ресурса.

- Моделированием выявленных факторов неидеальности работы ВЭС установлено, что их совокупный учет может приводить к снижению теоретически возможной мощности ВЭС на 15–20% и поэтому необходим при технико-экономическом обосновании проектов ВЭС.

Глава 3 “Разработка и применение методик достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории РФ”

Мощность ВЭУ: $$P_{ВЭУ} = K_{НИД} \cdot K_{ТГ}(n) \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{Vo}^{S_{ВК}} \int^{V_{БУР}} p(V) \cdot f(V)\, dV = K_{НИД} \cdot K_{ТГ}(n) \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \sum_{i=1}^{N} p(V_i) \cdot f(V_i)$$

$p(V)$ – рабочая, или мощностная характеристика ВЭУ, определяется расчетным путем или экспериментально (в сертификационных испытаниях) – нелинейная харктеристика

$f(V_i)$ – повторяемость скоростей ветра по градациям или $f(V)$ – аппроксимирующая $f(V_i)$ аналитическая функция – плотность вероятности распределения ветра по скоростям на высоте оси ВК, дающая погрешность определения ВЭП и $P_{ВЭУ}$ до 100% и более (в зависимости от эффективности методики)

Традиционно основной источник повторяемостей скоростей ветра по градациям $f(V_i)$ – данные многолетних метеорологические измерения на высоте 8 – 16 м и краткосрочной (1-2 года) ветровой разведки на метеомачтах

Аппроксимирующих аналитических функций $f(V)$ – известно свыше десятка, наиболее распространена за рубежом – двухпараметрическая функция Вейбулла (менее распространена функция Рэлея-Максвелла)

Классическое аналитическое определение $f(V)$ на высоте оси ветроколеса $H_{ВК}$ производится подъемом границ градаций при сохранении повторяемости внутри самих градаций $f(V_i)$, определенной по данным метеорологических измерений (8 – 16 м) с помощью более или менее точно установленных моделей нарастания скорости ветра с высотой $V(h)$

Слайд 9

Аналитическая методика достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России и стран СНГ

Кардинальное повышение достоверности методики моделирования ВЭП и $P_{ВЭУ}$ в России (с погрешностью ≤10–14% для равнин и ≤18–25% – для сложного рельефа) обеспечивается новыми методическими подходами (рис. 3.1)

1. $P_{ВЭУ}$ определяется по статистически установленной ее линейной связи со средними сезонными скоростями ветра
2. Вместо экстраполяции скоростей ветра с высот $h^{метео}$ (8–16 м) на $H_{ВК}$ ВЭУ (до 200 м) используется более точная интерполяция по данным МС и АС, зависящая от точности моделей $V(h^{метео})$ и V(100–600 м).
3. Характеристики ветра на $h^{метео}$ и $h^{аэро}$ вместо данных одной ближайшей МС и АС статистические моделируются по “очищенным” данным всех (до 50) МС района в радиусе до 250 км и всех (до 10) АС в радиусе до 600 км от искомой точки.
4. Функции ***G(V)*** вместо данных ветровой разведки и ближайшей МС (в зарубежных методиках) определяются по данным всех МС и АС района в радиусе до 500–600 км от ВЭС.

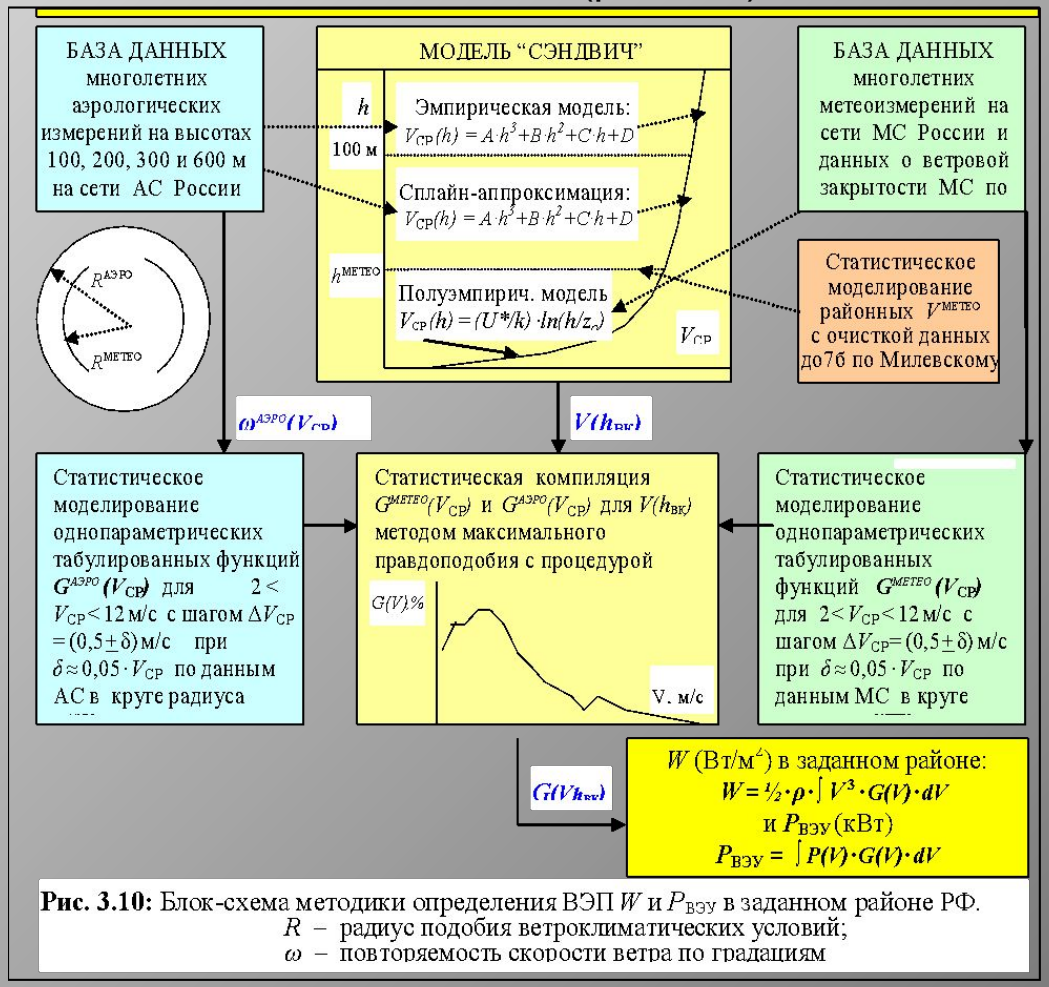


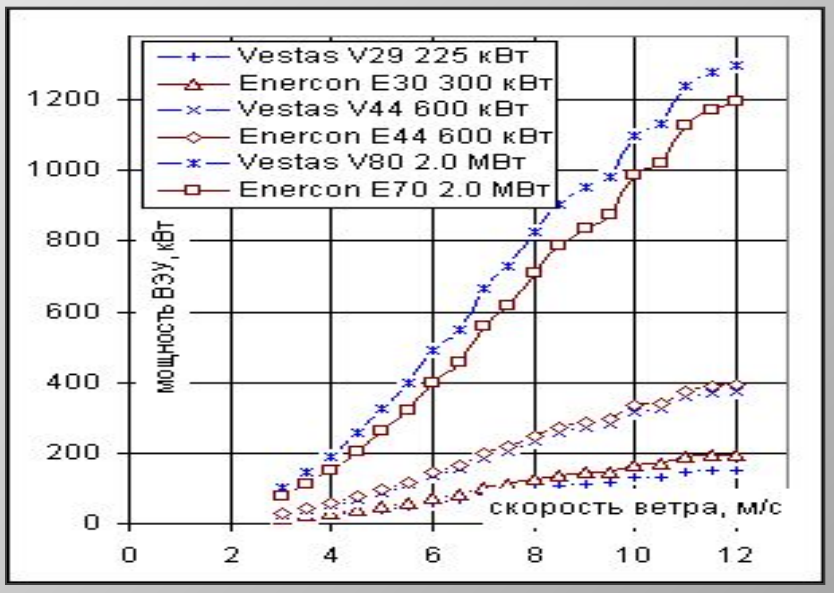
Рис. 3.10: Блок-схема методики определения ВЭП W и $P_{ВЭУ}$ в заданном районе РФ.
R – радиус подобия ветроклиматических условий;
ω – повторяемость скорости ветра по градациям

Слайд 10

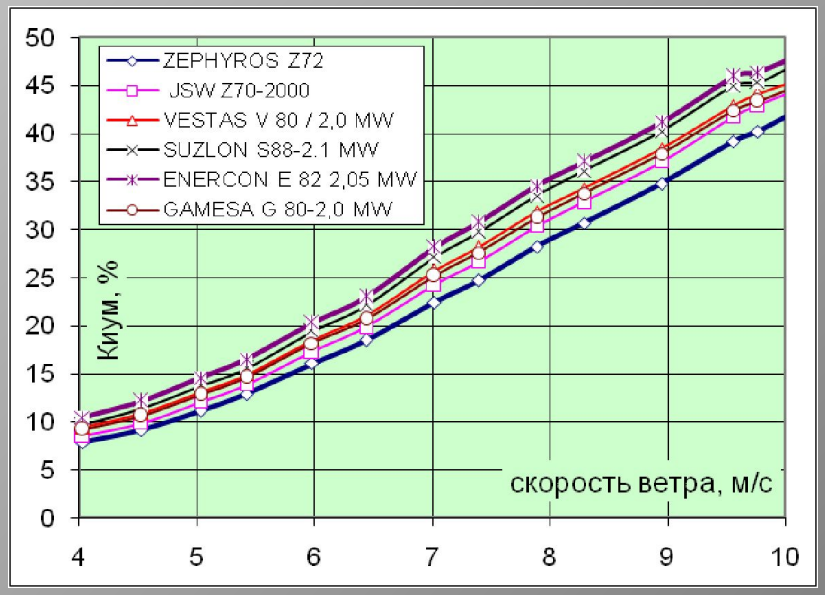
Принципиальная новизна, обеспечивающая эффективность современных методик определения ВЭП и ВЭУ

► Использование статистически установленных и обоснованных корреляционных связей (примерно линейных) между скоростями ветра и мощностями ВЭУ, отличающихся для регионов и сезонов и ВЭУ разных типов и мощностей

Зависимость среднегодовой РВЭУ от средней скорости ветра для Севера ЕТР (без процедуры сглаживания)



Зависимость среднегодового $K_{ИУМ}$ ВЭУ мощности ≈ 2 МВт от средней скорости ветра для Севера ЕТР (со сглаживанием)



Слайд 11 Исследование методических вопросов:

зависит ли ω(ΔV) от местности, региона, времени года, …???

метод исследования: *сравнение ω(ΔV) на разных МС с использованием БД*

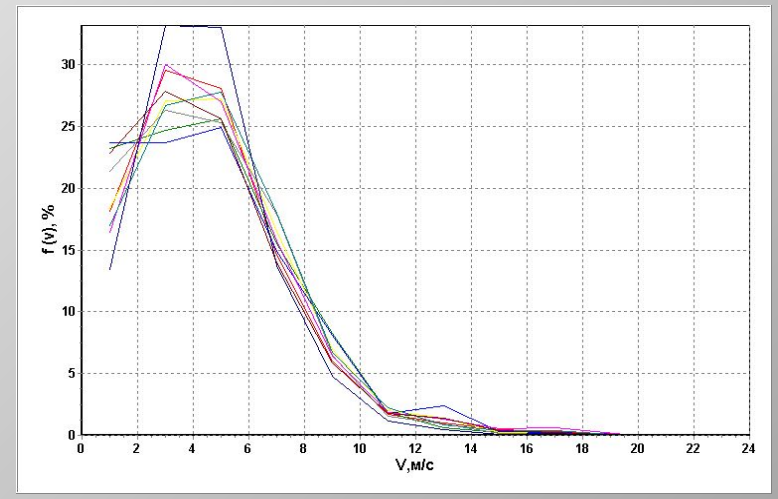
Выводы: ► *ω(ΔV) проявляют региональные и сезонные отличия*

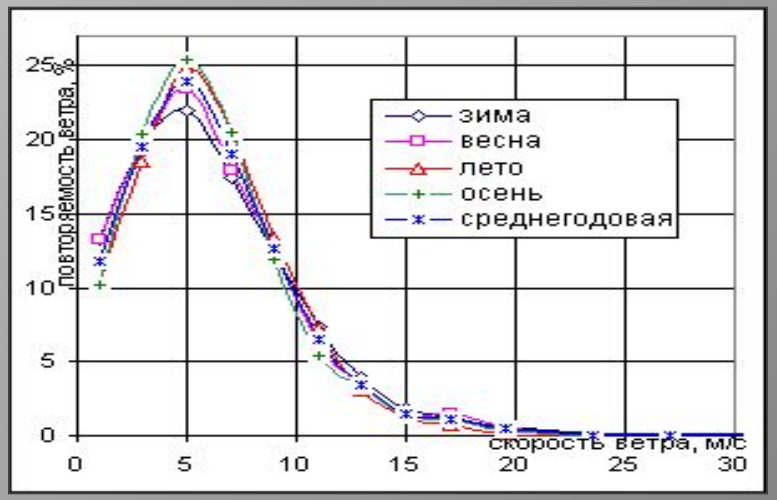
► *в ряде регионов ω(ΔV) имеет второй максимум при V = 12–17 м/с*

► *Выбор ω(ΔV) и построение для больших скоростей ветра ограничен статистической обеспеченности данными (число ω(ΔV) падает)*

Форма ω(ΔV) обнаруживает тесную (по значению $\Sigma p(V_i)\cdot\omega_i$) связь со скоростью ветра => повод для построения табулированных f(V) и G(v)

Определение функции *G(v)* в данном месте основано на статистическом моделировании средних региональных и сезонных однопараметрических (зависящие от средней скорости ветра) табулированных функций распределения ветра по скоростям по данным о повторяемости ветров по градациям, полученным на всех АС и МС рассматриваемого региона.





Слайд 12

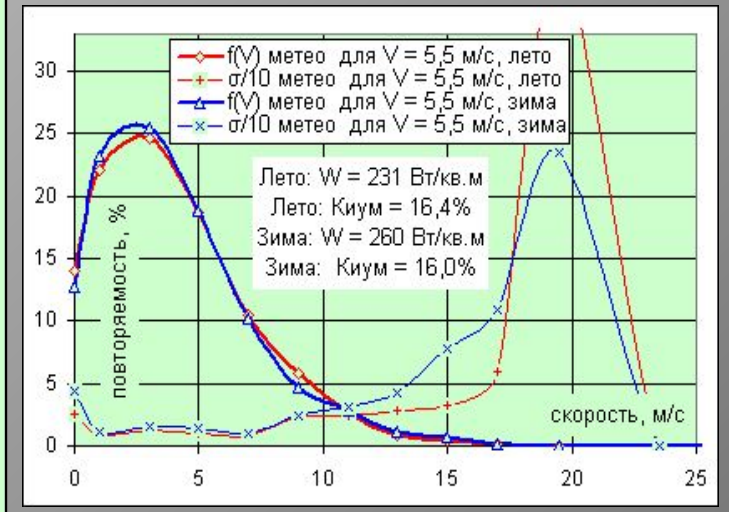
Статистическое моделирование функций *G(V)* по эмпирическим повторяемостям ветра по метеоданным МС

Архангельск, *G(V)* для зимы по данным метеорологических станций в радиу R = 600 км — Широта 65° сш — Долгота 40° вд

V, м/с	Центры градаций скорости, м/с													V, м/с	N	Штиль, V<4 м/с,%	Уд.мощн. W, Вт/м^2	σ_W, %	V 80 2 MW	$\sigma_{Рвэу}$, %
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19,5	23,5	27	32							
3,0	41,8	30,1	17,4	6,8	2,42	0,86	0,38	0,09	0,04	0,03	0	0	0	3,05	7	71,9	66,7	30,9	87	23,8
3,5	35,9	28,7	20,4	9,5	3,32	1,06	0,74	0,2	0,13	0,03	0,01	0,01	0	3,48	26	64,6	93,7	22,8	119	18,5
4,0	27,5	29,7	22,7	12,3	4,86	1,38	1,04	0,29	0,25	0,05	0	0	0	3,98	58	57,2	123,1	19,4	158	14,1
4,5	26,6	26,3	20,6	13,4	6,72	2,85	1,99	0,78	0,6	0,15	0,01	0	0	4,45	23	52,9	188,8	24,3	224	13,9
5,0	20,6	23,9	23,1	15,4	8,17	3,94	2,91	1,06	0,66	0,19	0,01	0	0	5,02	26	44,5	237,2	21,1	281	11,5
5,5	12,7	23,4	25,6	18,9	10,1	4,56	2,76	1,09	0,73	0,14	0,01	0	0	5,52	35	36,1	259,6	16,2	319	7,8
6,0	13,0	19,9	22,6	17,5	12,3	7,03	3,91	1,79	1,19	0,54	0,09	0,07	0,02	6,10	11	32,9	377,6	22,2	405	10,3
6,5	15,2	18,5	20,1	16,3	12,3	7,92	4,78	2,05	1,64	0,81	0,12	0,09	0,03	6,27	8	33,8	435,2	12,4	439	3,6
7,0	11,2	15,1	18,9	16,9	13,6	10,1	6,35	3,53	2,73	1,37	0,12	0,04	0	7,15	12	26,3	568,1	8,3	552	3,4
7,5	10,0	14,8	18,9	17,3	14,0	10,2	6,61	3,64	2,9	1,48	0,15	0,04	0	7,32	15	24,8	593,3	9,8	569	3,2
8,0	8,2	12,9	17,0	15,8	15,0	11,0	8,2	4,24	4,52	2,67	0,28	0,13	0,01	8,08	7	21,1	775,4	11,2	661	4,6
8,5	6,1	10,9	16,2	17,5	16,5	11,7	8,71	5,02	4,33	2,7	0,3	0,09	0,01	8,43	7	17,0	809,1	9,6	705	2,4
9,0	4,4	9,7	14,9	17,6	16,3	12,4	9,5	6,06	5,14	3,42	0,56	0,09	0,01	8,98	5	14,1	933,9	12,6	769	5,3
9,5	4,5	8,5	13,1	16,1	15,0	14,0	9,82	6,49	6,84	4,7	0,85	0,21	0,03	9,56	9	12,9	1129,9	11,7	834	3,7
10,0	4,3	8,0	12,4	15,2	14,4	13,9	9,94	7,26	7,45	5,56	1,15	0,37	0,06	9,92	7	12,3	1262,7	7,0	867	3,1
10,5	2,5	7,2	12,1	14,2	13,7	14,0	11,4	8,53	8,02	6,12	1,5	0,54	0,07	10,5	3	9,7	1406,4	6,4	926	4,7
11,0	2,1	5,9	10,9	11,6	13,0	17,0	12,2	7,94	9,03	7,07	2,02	0,99	0,28	11,2	5	7,9	1707,3	10,9	987	1,8
11,5	1,7	5,9	10,5	10,9	12,4	17,0	11,5	8,35	9,25	8,48	2,26	1,16	0,37	11,5	8	7,6	1857,3	8,8	1005	2,6
12,0	1,5	5,8	9,9	10,4	11,8	16,4	10,9	8,67	10,0	9,98	2,45	1,31	0,52	11,8	6	7,3	2041,9	6,9	1026	1,9

Архангельск, СКвО G(V) по градациям для зимы по данным МС в R = 600 км

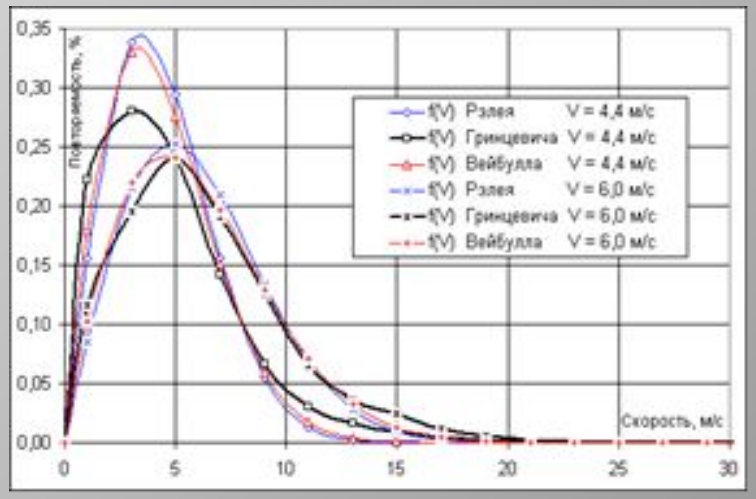
V, м/с	Центры градаций скорости, м/с												
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19,5	23,5	27	32
3,0	11,5	14,6	15,0	14,8	32,8	56,2	120,8	94,97	242	245	0	0	0
3,5	16,1	20,9	14,4	12,3	26,4	54,4	60,8	105	108	163,9	390,5	391	0
4,0	19,0	15,4	13,2	12,3	23,2	59,9	44,0	85,5	81,5	168,1	435,2	0	0
4,5	23,9	14,5	18,8	17,0	11,1	46,7	40,2	90,76	65,7	132,5	306,3	469	0
5,0	36,5	18,4	22,5	15,7	13,1	31,6	24,3	57,44	78	116,1	198,4	243	0
5,5	44,4	10,8	15,4	14,8	10,5	24,0	30,6	42,46	77,9	109,4	235,5	0	0
6,0	33,0	5,0	20,3	21,2	8,7	26,6	33,3	25,51	46,4	74,05	103,8	145	167
6,5	21,2	11,0	12,2	18,4	9,7	19,2	20,0	16,15	21,3	46,83	88,3	133	132
7,0	20,4	10,4	8,5	7,4	11,1	7,2	7,9	32,66	17,5	40,1	70,9	94,7	297
7,5	27,1	10,2	8,9	10,5	13,3	5,9	11,5	31,24	24,9	47,66	51,0	119	255
8,0	27,5	13,9	7,0	9,3	5,8	10,6	3,9	25,17	15,1	37,36	40,0	50,6	115
8,5	49,8	8,4	7,3	14,4	10,9	8,6	6,9	11,29	20	33,25	34,6	93,7	144
9,0	53,5	12,5	5,3	9,1	12,9	13,5	16,5	14,78	11,6	41,27	66,0	109	200
9,5	37,9	12,5	9,9	11,0	11,4	13,7	13,9	13,24	17,9	28,83	41,3	65,3	125
10,0	37,5	10,9	7,0	6,2	5,8	10,1	12,5	13,22	13,9	20,66	42,2	24,2	74,5
10,5	17,8	18,1	7,2	8,6	3,7	10,6	14,7	2,97	11,3	19,49	36,1	11,5	70,7
11,0	12,2	3,5	8,5	8,2	10,1	9,4	10,4	10,87	10,9	11,02	28,6	42,1	65,5
11,5	35,1	3,2	9,7	6,6	8,5	8,0	9,7	14,21	11,8	16,71	18,8	29,2	54
12,0	44,3	4,2	8,4	6,7	4,0	6,6	2,8	15,24	11,6	7,14	9,4	17,9	52,6



Слайд 13

Сравнение функций плотности распределения ветра по скоростям:

Вейбулла, Рэлея и *G(V)* (Гринцевича), построенным по среднегодовым скоростям для Калининграда ($V_{СР}$ = 4,4 мс) и Балтийска ($V_{СР}$ = 6,0 мс) по данных метеостанций Балтийского региона.



Значения удельной мощности ветра на высоте 10 м для Калининграда и Балтийска, рассчитанные с использованием разных функций распределения			
Аппроксимирующая функция $f(V)$	Вейбулла	Гринцевича	Рэлея
Калининград $V_{СР}$ = 4,4 м/с	106,5	133,3	99,6
Балтийск $V_{СР}$ = 6,0 м/с	271,4	323,8	252,7

СКвО, рассчитанные по данным АС при определении *W* и $P_{ВЭУ}$ в р-не Барабинска, в 2–4 раза меньше, чем по данным МС.

Параметр	Средние годовые			Зима		
	Метео, R = 340 км	Метео, R = 680 км	Аэро, R = 680 км	Метео, R = 340 км	Метео, R = 680 км	Аэро, R = 680 км
Удельная мощность ветра	14,31	16,66	3,35	15,79	18,05	8,28
$P_{ВЭУ}$ VESTAS V-80 – 2,0 МВт	6,94	6,95	1,64	6,55	6,64	3,52
$P_{ВЭУ}$ Siemens SWT – 2,3 93	6,48	6,55	1,87	6,00	6,16	3,36
$P_{ВЭУ}$ ENERCON E 82 –2,0 МВт	6,43	6,46	1,84	5,90	5,98	3,31

Слайд 14

Методики достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России, стран СНГ и Балтии

Классическое определение *f(V)* на высоте оси ветроколеса $H_{ВК}$ производится подъемом границ градаций скорости ветра при сохранении их повторяемости внутри самих градаций $f(V_i)$, определенной по данным метеорологических измерений (8 – 16 м) с помощью более или менее достоверных моделей *V(h)*.

Таблица 3.4. **Методики моделирования и аппроксимации высотных профилей скорости в приземном 100 – 200-метровом слое**

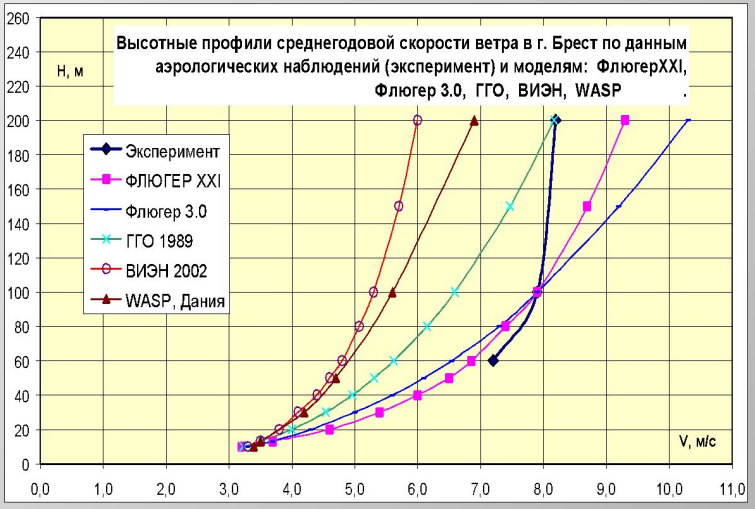
№	Методика, разработчик	Используемые метеоданные	Используемые аэроданные	Аппроксимация распределения f(V)	Аппроксимация высотного профиля
1	Универсальная модель	соседней МС (2200 МС РФ)	не используются	любая известная, соответствующая скорости и высоте	$V(z) = V_{фл}\ (z/h_{фл})^m$ m = 1/7 для суши m = 1/10 для моря
2	WASP, RISO, Дания	соседней МС + модель Zo (332 МС РФ)	не используются	функции Вейбулла по метеоданным с подъемом на высоту	$V(z) = V_o \cdot \ln(z/z_o)$
3	NASA, NREL, США	модель с разрешением 1x1 км	не используются	функция Рэлея по метеоданным	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$
4	ЦАГИ, 1960	соседних МС-аналогов (≈500 МС)	не используются	функции Колодина и Поморцева	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$
5	ГГО, 1989	соседних МС (≈1100 МС РФ)	не используются	Г-функции по данным ближайших МС	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$
6	ФЛЮГЕР 3.0, ЦАГИ, 1994	соседних МС класса 7б и 6б (≈1000 МС РФ)	V на уровне 100 м соседней станции	табулированные региональные функции Гринцевича	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ $m=\ln(V_{100}/V_{фл})/\ln(H_{100}/H_{фл})$
7	АО “ВИЭН”, 2002	соседних МС (≈1100 МС РФ)	Не используются	подъем эмпирических повторяемостей	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$
8	ФЛЮГЕР 2000, НИЦ “АТМОГРАФ”	соседних МС класса 7б (≈ 1000 МС РФ)	V на 100 м по данным всех АС района	Табулированные региональные функции Гринцевича	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$
9	ФЛЮГЕР XXI, НИЦ “АТМО-ГРАФ” 2003	средние статистические по району с очисткой (≈1100)	V на h = 100, 200, 300 и 600 м всех АС региона	Табулированные региональные функции Гринцевича	С моделированием $V_{суша}(z) = V_c \cdot \ln(z/z_c)$ $V_{море}(z) = V_м \cdot \ln(z/z_м)$

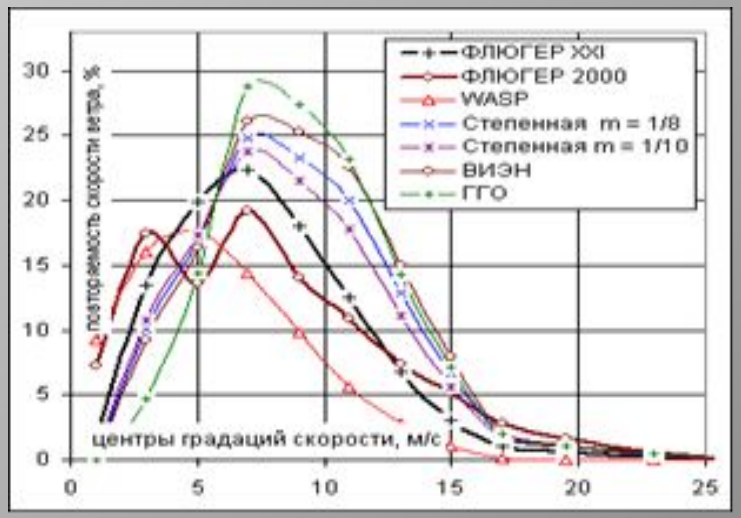
Наиболее распространена за рубежом логарифмическая модель: $V(h) = V^* \cdot [\ln(h) - \ln(Z_o)]$

Слайд 15 а

Методические основы моделирования ВЭП и мощности ВЭУ:

***П*одъем $\omega_n(\Delta V_n)$ по данным МС на высоту оси ветроколеса $H_{ВК}$ для ВЭУ 80-х годов с $H_{ВК}$ < 30 – 40 м был оправдан: экстраполяция с 10–15 м на 30 м не приводила к непозволительным для практики погрешностям, но для современных ВЭУ $H_{ВК}$ достигает 100 – 170 м.**





Разброс непозволительно велик для практики для $H_{ВК}$ > 35–40 м (вдвое) и зависит от выбора опорной или опорных (каких и в каком количестве) МС и вида аппроксимации *V(h)*, но неприятнее всего – отсутствия критерия истины при использовании только данных МС

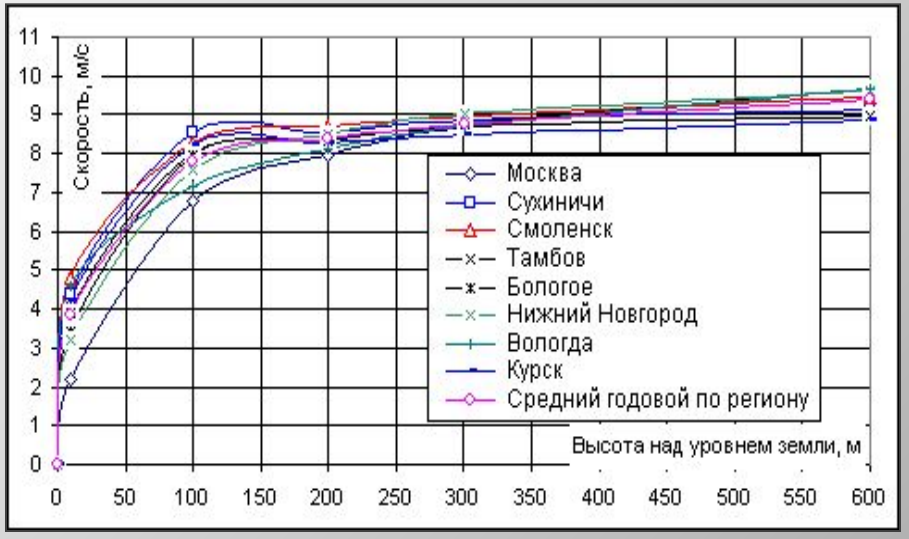
Выход – измерять на высотах или привлекать аэрологические данные !!!

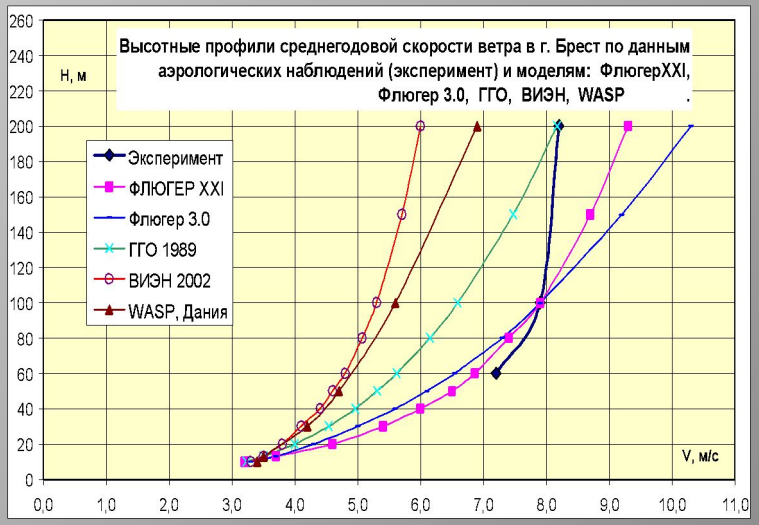
Из-за отсутствия последних Запад развил ветровую разведку, Атмограф пошел путем статистического моделирования, опираясь на аэрологические данные.

Слайд 15 б

Методические основы моделирования ВЭП и мощности ВЭУ:

Для повышения точности моделирования V(h) по данным АС важны установленные факты быстрого нарастания V(h) на высотах 0–100 м и медленного на 100–600 м, и уменьшение их разброса с высотой.





Высотная изменчивость *V(h)* на 100–600 м по данным АС падает с высотой

Таблица. Высотная изменчивость СКвО (в %) среднегодовых скоростей ветра

Станция \ Высота	15 м	100 м	200 м	300 м	600 м
Барабинск	14,7	5,3	4,7	3,9	2,9
Александровск-на-Сахалине	20,2	12,3	10,5	8,2	6,8

Слайд 16

Разработка и применение методик достоверного моделирования профилей скорости в ПСА для определения ВЭП и мощности ВЭС

Таблица 3.8. **Сравнение модельных данных *V(h)* на высоте 80 м с осредненными данными 28 АС**

№	Методика	Аппроксимация *V(h)*	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	σ_V, %
	Эксперимент	Данные эксперимента	6,4	5,9	5,5	5,8	5,9	0,0
1	Универсальная модель	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ m = 1/7 для суши m = 1/10 для моря	9,66 8,94	7,44 6,88	6,14 5,68	8,13 7,52	7,84 7,25	16,4 15,2
2	WASP	$V(z) = V_o \cdot \ln(z/z_o)$					5,00	15,3
5	ГГО	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$	11,28	9,10	7,83	9,68	9,47	15,4
6	Флюгер 3.0, ЦАГИ, 1994	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ $m=\ln(V_{100}/V_{фл})/\ln(H_{100}/H_{фл})$	6,51	5,84	5,37	5,83	5,89	1,74
7	АО "ВИЭН"	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/z_{фл})^m$	10,15	8,56	7,32	8,54	8,64	12,1
9	Флюгер XXI "Сэндвич"	Трехслойная модель	6,53	5,87	5,42	5,85	5,92	1,56

Наиболее точную аппроксимацию *V(h)* дает разработанная автором трехслойная модель "Сэндвич", описываемая выше 100 м кубической аппроксимацией средних сезонных данных АС на высотах 100, 200, 300, 600 м. В слое 0–*h* *V(h)* моделируется логарифмическим профилем (3.5) с параметром z_o, моделируемым по методике WASP, и U_o. определяемым по данным ближайших МС. В слое $h^{метео} < h < 100$ м: *V(h)* аппроксимируется кубическим сплайном с коэффициентами, определяемыми из условий гладкой сшивки с профилем (3.5) на нижней границе и кубическим полиномом – на верхней границе (на 100 м).

Для рассмотренных 28 АС "Сэндвич" обеспечивает точность определения *V(h)* до 100 м с погрешностью ≤ 6–7%. Максимум погрешностей – на высотах 35 – 50 м.

Ее использование позволило оценить высоты применимости логарифмического профиля скорости h_{log}. Данные на промежуточном уровне использованы в качестве критерия точности моделирования, а искомая высота *hlog* определялась минимизацией ошибки расчетов *V(h)* на промежуточном уровне изменением *hlog*. Согласно проведенному исследованию использование (3.5) правомочно до h_{log} ≤20–25 м

Слайд 17

Разработка и анализ методик достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России

(сравнение точности моделей автора и WASP)

Таблица 3.5. **СКвО (в процентах) данных методики WASP от многолетних аэрологических**

Высота :	100 м			200 м		
Методика :	ФЛЮГЕР XXI	WASP (3.5)	WASP (3.6)	ФЛЮГЕР XXI	WASP (3.5)	WASP (3.6)
Скорость ветра, м/с Погрешность, %	6,73 0	5,60 26,5	6,1 14,2	7,16 0	6,86 21,6	7,0 12,3
Удельн. мощность ветра, Вт/м^2 Погрешность, %	561,0 0	293,1 69,7	423,7 36,8	818,3 0	510,5 63,84	653,2 38,1

Таблица 3.7. **Сравнение среднегодовых данных модели и эксперимента АС Новосибирск**

Методика:	$V(z)=V_o \cdot \ln(z/z_o)$ (ФЛЮГЕР XXI)	$V(z) = V_{фл} \cdot (z/z_{фл})^m$ (ФЛЮГЕР 3.0)	$V(z)=V_{фл}\,(z/z_{фл})^m$ (ВИЭН)	$V(z)= V_{фл} \cdot (z/z_{фл})^m$ (ГГО 1989)	WASP, (3.5)	RISO (3.6)
$V_{эксп}$ - $V_{мод}$, 60 м	4,7 %	9,3 %	35,2 %	21,9 %	31,9%	17,5%
$V_{эксп}$ - $V_{мод}$, 100 м	0 %	0 %	34,8 %	16,6 %	29,1%	15,9%

Таблица 3.6. **Сравнение расчетных по модели WASP и экспериментальных параметров ветра [3]**

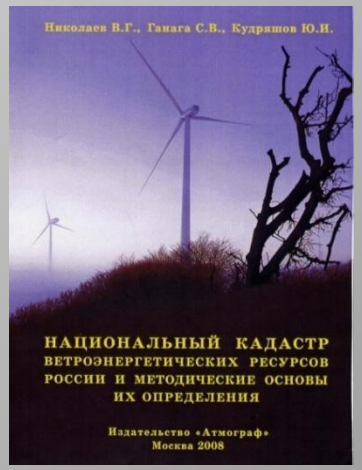
Метеостанция / Параметр :	Скорость ветра, м/с		Удельная мощность, Вт/м^2	
Высота :	100 м	200 м	100 м	200 м
Балчуг, модель (3.5)	2,8	3,5	25	49
Ново-Иерусалим, модель (3.5)	4,1	5,0	85	167
Егорьевск, модель (3.5)	5,7	7,0	197	384
Данные измерений на АС	6,7	7,5	392	506

Наиболее авторитетная и достоверная международная аналитическая методика WASP (RISO) не достаточно точна для практического применения как за рубежом (корректируется данными ветровой разведки), так и в России !!!

Слайд 18

Наличие ветра в России (по данным моделей WASP и “Сэндвич”)

Среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м над землей



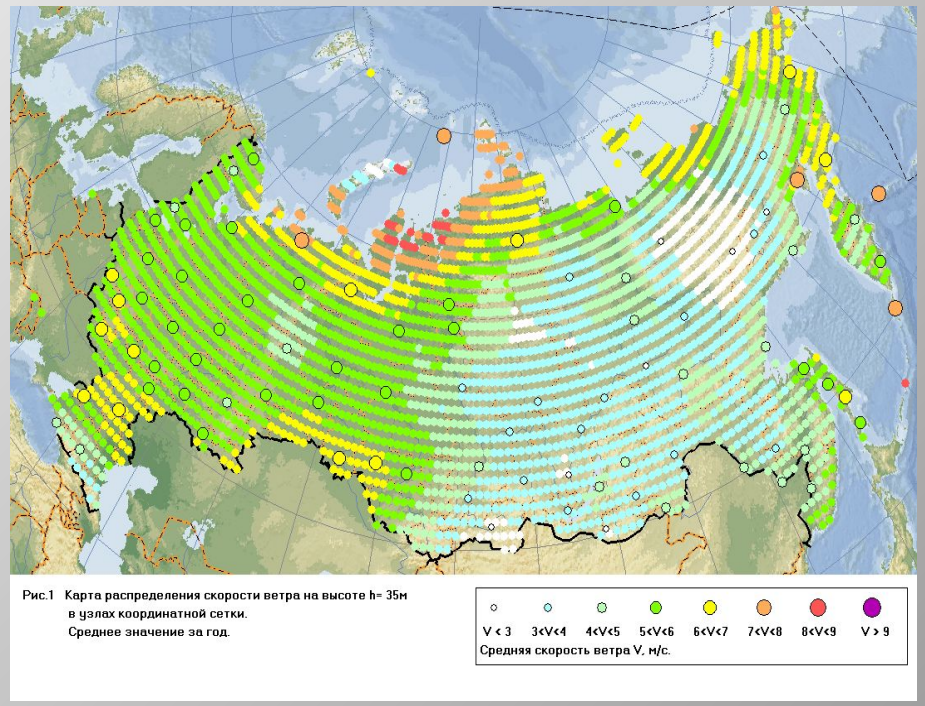


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте h= 35м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.

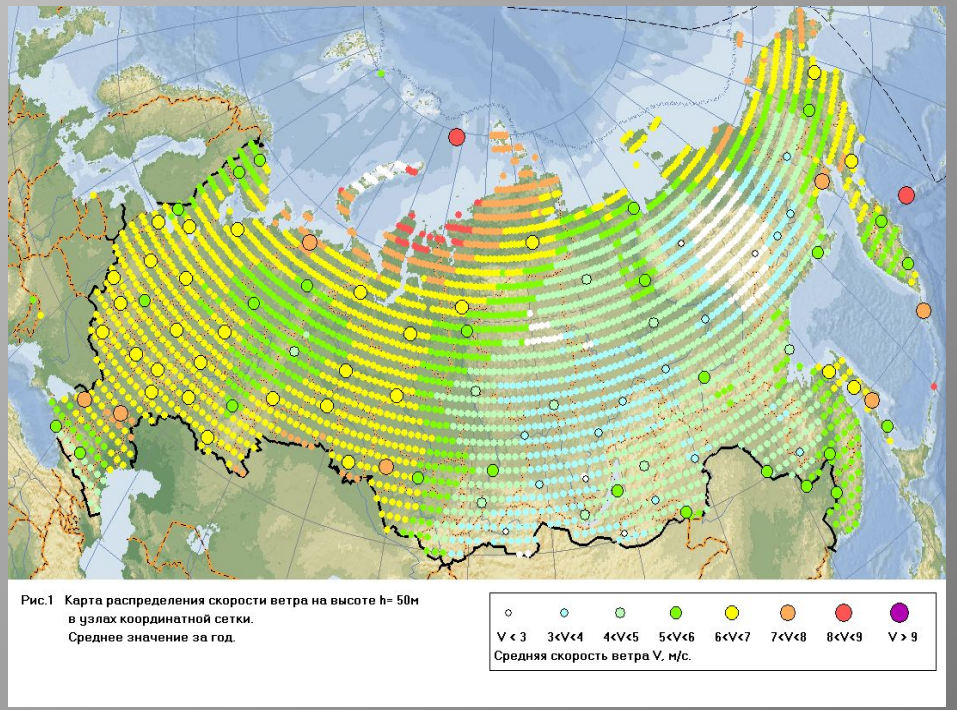


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте h= 50м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.

Слайд 19

Принципиальная новизна, обеспечивающая эффективность современных методик определения ВЭП и ВЭУ

- Использование совместно с метеоданными (10 – 14 м) аэрологических данных для высот 100, 200, 300, 600 м и в силу малой межстанционной их изменчивости моделировать ветровые характеристики на высотах до 200 м с погрешностью ≤ 10 - 13% для равнинных и ≤ 20 – 24% для горных территорий и рассчитывать высотные профили скорости ветра в 200-метровом слое атмосферы с требуемой для практики точностью ≤ 25%.
- Использовании более обоснованных физически и статистически и точных по сравнению с используемыми ныне развитого автором метода численного моделирования ветровых характеристик в приземном 200 -метровом слое атмосферы с учетом местных особенностей рельефа и подстилающей поверхности, основанного на классификации Милевского.
- Цель учета свойств рельефа и поверхности – уменьшение неопределенности определения характерной местной скорости ветра методами статистического моделирования с использованием методики “очистки” данных

Первичные и “очищенные” значения среднегодовых скоростей ветра и его среднеквадратически отклонений (СКвО) в районе метеорологических станций в разных регионах России

Местонахождение метеостанции	Данные ГМС		Данные ГМС с “очисткой”	
	скорость, м/с	СКвО, %	скорость, м/с	СКвО, %
Волгоград	4,12	21,7	5,25	11,5
Москва (Сергиев Посад)	3,64	12,7	4,1	8,62
Мурманск	4,41	38,8	5,61	15,3

Слайд 20

Методика “очистки” метеорологических данных, основанная на классификации Милевского.

С учетом повторяемости ветров по направлениям θ_i для каждого месяца и сезона для каждой МС рассчитан и используется средний коэффициент Милевского $K^{M}_{ср} = \Sigma\ 8K_i \cdot \theta_i / 8$. Его связь со скоростями ветра дана на рис.3.8. В методике автора классификация Милевского используется для “очистки” данных МС, или приведения их к условиям ровной плоской поверхности без элементов экранирования (класса 7б по Милевскому). Статистическая связь ***K*Mср** и ***zo*** по классификации WASP, установленная автором по данным 200 российских МС с достоверностью $R2>0,9$ описывается регрессионным уравнением: $Ln(z_o)=0,0021 \cdot K^3 - 0,0845 \cdot K^2 + 0,645 \cdot K + 3,314$. Согласно (3.9) коэффициенту $K_{Mср}$ класса 7б соответствует z_o=0,04 (класс 1 по WASP с z_o=0,03), а $K_{Mср}$ класса 6б и 11б – z_o=0,1 и z_o=0,0002 (классы 2 и 0 по WASP).

Рис. 3.8. Зависимость среднегодовой скорости ветра от коэффициентов Милевского

Рис. 3.9. Связь коэффициентов Милевского и параметра z_o по классификации WASP

Слайд 21

Глава 4 “Исследование возможностей и эффективности использования ВЭС в различных регионах и субъектах РФ”

► Исследованы перспектив и эффективности использования ВЭС для выработки *ЭлЭн* в промышленных масштабах в различных регионах и субъектах РФ.

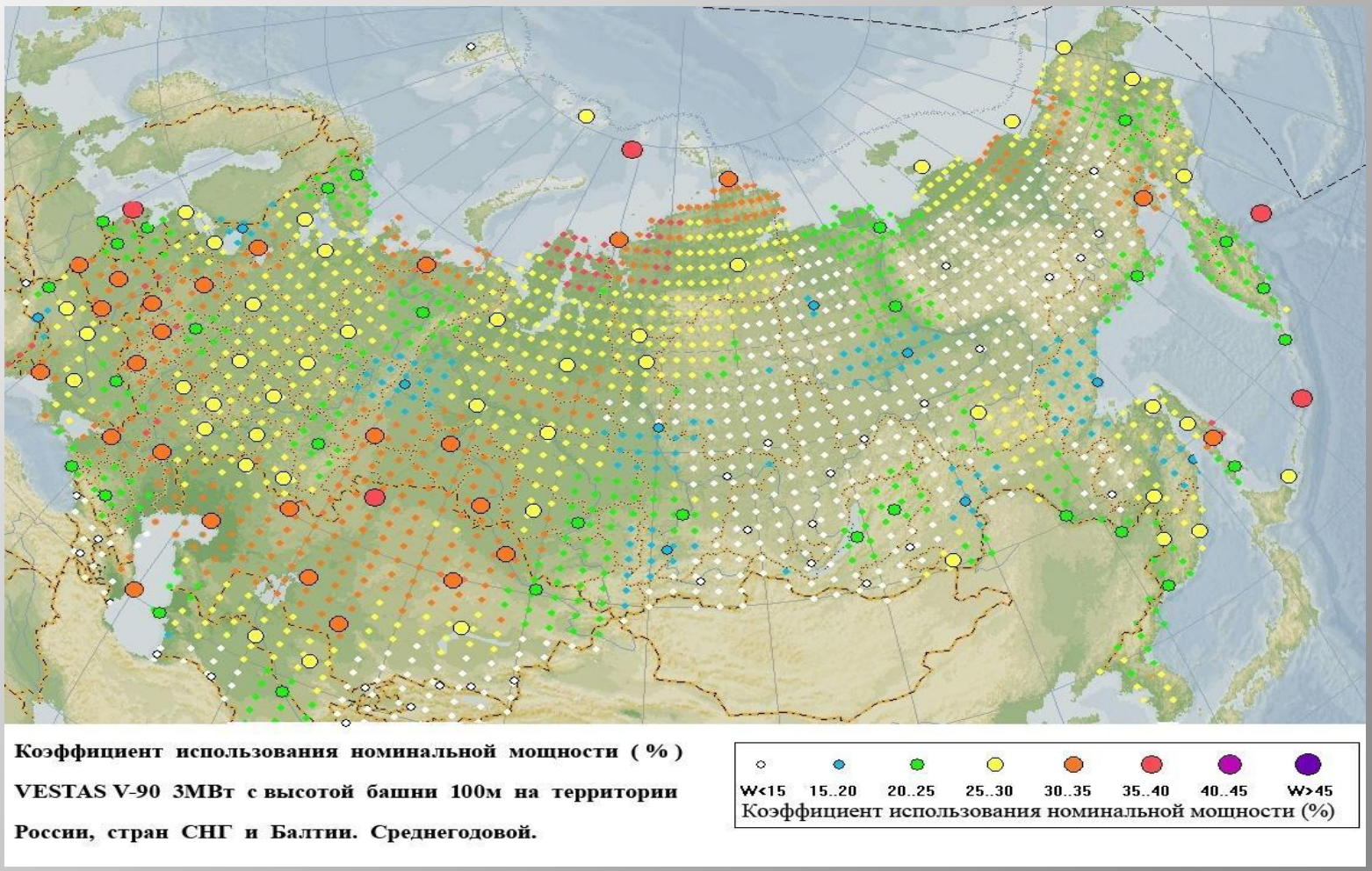
► Исследованы и установлены новые закономерности территориального, сезонного и высотного распределения на территории РФ скоростей $V_{СР}$, удельных мощностей ветра $W_{СР}$, вероятностей ветроэнергетических штилей $P_{Шт}$ ($V \leq 4$ м/с) и погрешностей их определения.

► Существенно уточнены количественные параметры ВЭП на традиционно считающихся перспективными для использования ВЭС побережьях морей Северного Ледовитого и Тихого океанов.

► Выявлены новые регионы страны, перспективные для экономически эффективного использования ВЭУ большой и средней мощности.

Слайд 22

Распределение по территории России коэффициентов использования номинальной мощности ВЭУ V90 с диаметром ВК 90 м и высотой башни 100 м



Места, отмеченные на карте оранжевым и красным, обладают достаточным ВЭП по любым международным критериям, обеспечивающим коэффициенты использования номинальной мощности ВЭУ $К_{ИУМ} \geq 30$ % (≥ 2700 тысяч часов работы ВЭС с номинальной мощностью).

Слайд 23

Технический ветроэнергетический потенциал России

проведен с допущением о 10%-ном землеотводе под ВЭС по средней для субъектов мощности "типовой" ВЭУ V90 с $H_{ВК}$ = 100 м при оптимальном размещении ВЭУ в узлах правильной треугольной сетки с плотностью на 1 км^2 $N\Delta=1{,}155\cdot(1000/n\cdot D)^2$, выбранной на основе анализа $K_{ИУМ}$. Средние за ресурс коэффициенты $K_{НИД}$ и $K_{ТГ}$ в расчетах равны $K_{НИД}$=0,81 и $K_{ТГ}$=0,94. Среднее по РФ расчетное значение $K_{ИУМ}$ ВЭУ V90 с башней 100 м составляет ≈19,6%, чему соответствует с учетом погрешности вычислений средняя годовая мощность $P_{ВЭУ}$ = 588 ± 87 кВт. До 30 субъектов РФ обладают ВЭР, достаточными для эффективного их использования по всем международным критериям ($K_{ИУМ.}$ ≥28%).

Таблица 4.3. **Технический потенциал ВЭР по Федеральным округам РФ.**

№	Федеральный округ	Технический потенциал по автору, млрд. кВт·ч/год	Технический потенциал по [13], млрд. кВт·ч/год
1	Центральный	588	71,8
2	Северо-западный	1428	432,6
3	Южный	564	176,6
4	Приволжский	872.8	236,3
5	Уральский	1 577	1 617,0
6	Сибирский	2 754	1 513,0
7	Дальневосточный	3 689	2 469,4
	ИТОГО:	**11 473**	**6 516,6**

Суммарный технический ВЭП РФ вдвое превышает оценки предшественников, при этом его доля в Центральном, Северо-Западном, Приволжском и Южном ФО, где проживает 73% населения РФ составляет 30% против полученных ранее 14%, что более перспективно для широкомасштабного использования ВЭС

Вывод: ВЭП имеют вполне благоприятное распределение по России для их промышленного освоения и широкомасштабного использования и в 13 раз превышает годовую выработку всех ЭС страны. Требуемая площадь под ВЭС с годовой выработкой ≈ 80 млрд кВтч – 0,7% от территории страны.

Глава 5. “Оценка экономических показателей современных ВЭС на территории РФ и возможного экономического эффекта их широкомасштабного использования”

Схема методики моделирования экономических показателей ВЭС в местах и районах их предполагаемого использования

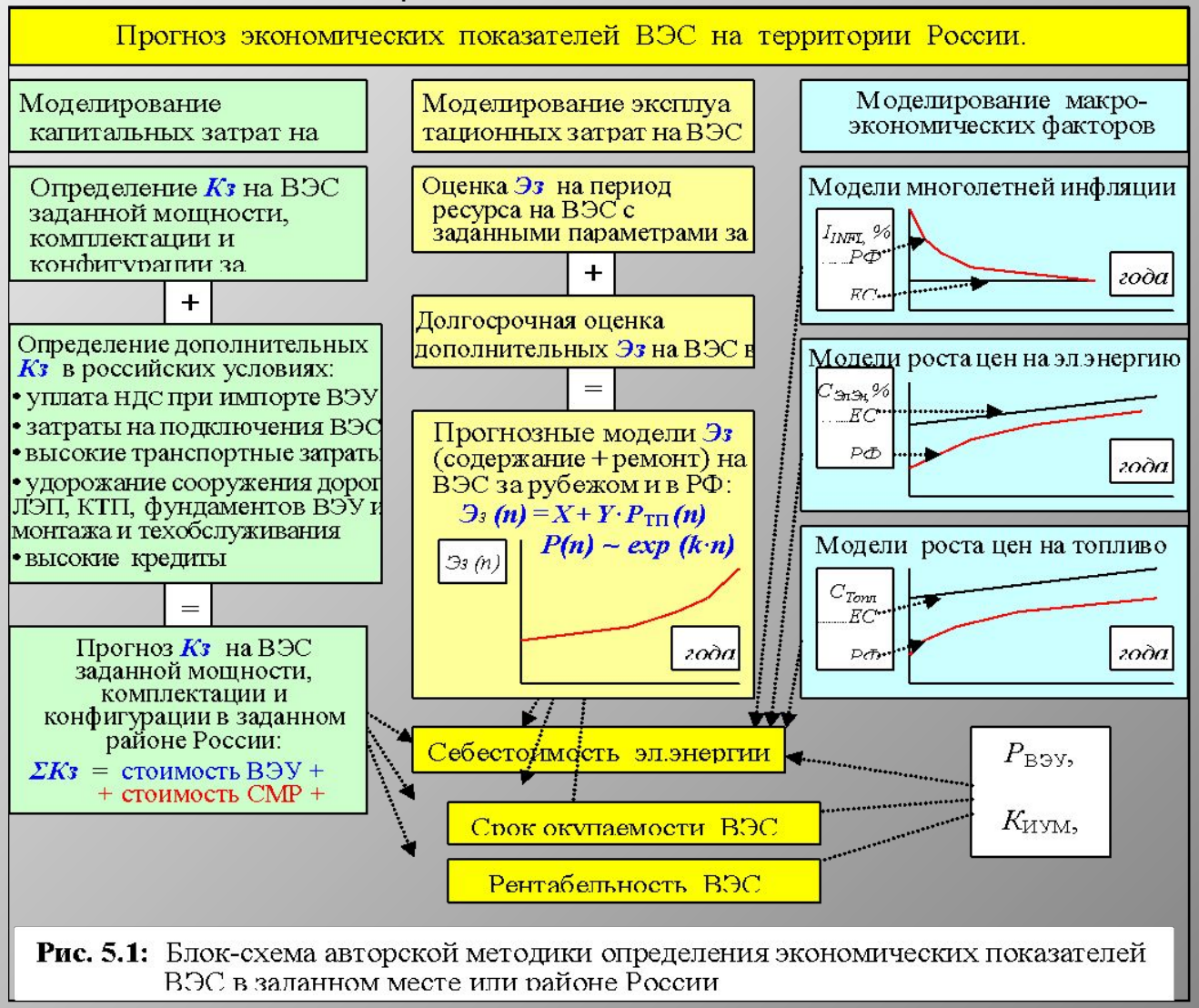


Рис. 5.1: Блок-схема авторской методики определения экономических показателей ВЭС в заданном месте или районе России

Слайд 25

Минимизация погрешностей из-за неопределенности долгосрочного прогноза *Эз* на ВЭС и ТЭС при высоком и нелинейном росте инфляции и цен на *ЭлЭн* и газ и неустановленной правовой базе, достигнута построением для них стоимостных моделей *Кз* и *Эз* в условиях России с учетом их многолетнего хода.

Согласно исследованию неадекватный прогноз макроэкономических факторов может приводить к погрешностям >20–30% при прогнозе экономических показателей ВЭС

Развитая модель эксплуатационных затрат на ВЭС построена автором в предположении линейной связи $Эз_n$ с вероятностью простоев ВЭУ $P_{ТП}(n)$ в n-м году: $S_n(n) = S_o + \$ \cdot P_{ТП}(n)$ **(5.6)** с использованием обобщенных данных о многолетнем ходе *Эз* на ВЭС в странах ЕС,

Многолетний ход среднегодовых *Эз* на ВЭУ разных поколений (эксплуатационные данные в % *Кз*)

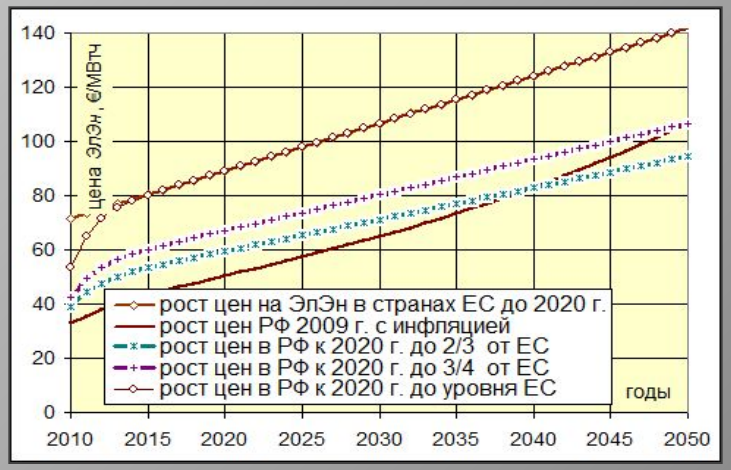
Тип ВЭУ\ Годы эксплуатации	1 – 2	3 – 5	6 – 10	11 – 15	16 – 20
ВЭУ 600 кВт в ЕС	1,0	1,9	2,2	3,5	4,5
ВЭУ 600 кВт в ЕС		*1,88 – 1,92*	*2,11 – 2,26*	*4,21 – 4,73*	*4,42 – 5,09*
ВЭУ 2000 кВт в ЕС		*1,87 – 1,94*	*2,20 – 2,33*	*4,04 –4,47*	*4,44 – 4,96*

Слайд 26

Связь *Эз* на ВЭС с переменной инфляцией I_n описывается разработанной автором моделью: $I_n=(I_o-I_\infty)\cdot exp(-k_I\cdot n)+I_\infty$, где I_o, I_n и I_∞ – индексы инфляции в год пуска ВЭС, в *n*-ный и 20-ый года работы ВЭУ

Доходная составляющая ВЭС определяется выручкой за *ЭлЭн* или экономией замещенного ими топлива. Сценарии цены на топливо в РФ ограничены сверху ценами ЕС, а снизу – ценами, растущими с инфляцией.

Рост тарифов и цен на *ЭлЭн* ε_n и топливо f_n моделируется автором моделями типа:
$\varepsilon_n=(\varepsilon_o-\varepsilon_\infty)\cdot exp(-K_\varepsilon\cdot n)+\varepsilon_\infty$ **(5.9)** и
$f_n=(f_o-f_\infty)\cdot exp(-K_f\cdot n)+f_\infty$ **(5.10),** где ε_n, ε_o и ε_∞ – индексы цен на *ЭлЭн,* а f_n, f_o и f_∞ – индексы цен на газ в году ввода ВЭС, в *n*-ном году и последнем году эксплуатации (рис. 5.3).

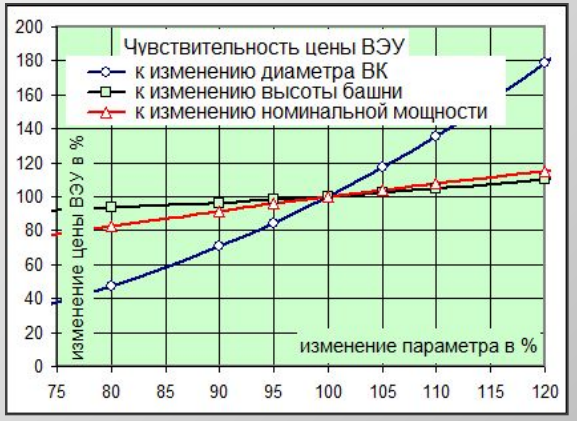


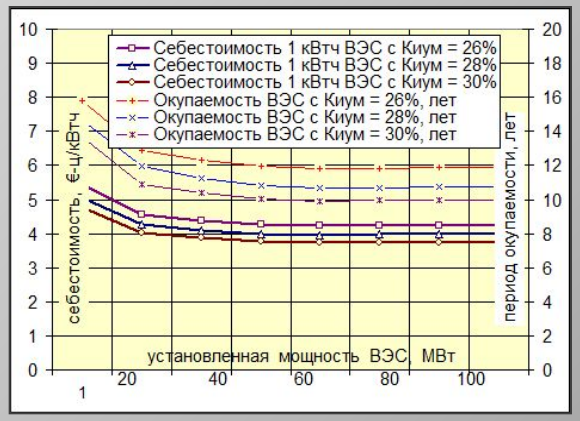
Методика прогноза экономических показателей ЭС с учетом возможных сценариев и нелинейности моделей реализована программой их расчета и сравнительного анализа на ПЭВМ, выдающей на выходе в цифровом и графическом виде временные ряды затрат, доходов и их балансов (ежегодных, суммарных к n-му году и средних за срок их работы) и расчетные значения себестоимости ЭлЭн, сроков окупаемости и рентабельности ВЭС.

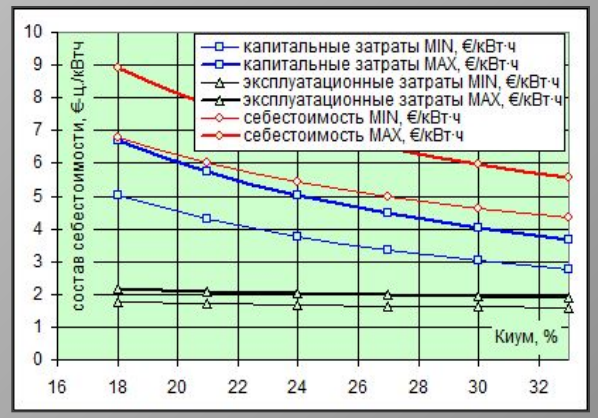
Слайд 27

Разработанной методикой решен ряд методических и практических задач.

► исследована чувствительность моделей *Кз* и *Эз* ВЭС к изменению определяющих их факторов: $К_{ИУМ}$, $К_{ТГ}$, стоимости ВЭУ, КТП, внутренних и магистральных ЛЭП и дорог, а также наиболее трудно прогнозируемых цен на *ЭлЭн* и газ и инфляции.







► Выявлено, что неопределенность сценариев их роста в РФ и в ЕС может приводить к погрешностям прогноза баланса на ТЭС и ВЭС до 50%. Количественно определено уменьшение *СЭл* ВЭС с ростом их мощности

► Анализом затрат на проектирование ВЭС за рубежом установлено, что затраты на проектирование в РФ при использовании методик автора могут быть снижены на 20–25%.

Слайд 28

► дан анализ возможных и выбор наиболее эффективных для РФ схем закупочных цен на *ЭлЭн* ВЭС – необходимого условия широко-масштабного их использования в РФ.

► предложена универсальная и вполне реализуемая схема закупочных цен ВЭС с надбавками к цене *ЭлЭн* оптового рынка, равными стоимости замещенного газа в РФ, обеспечивающая полноценное использование технико-экономических достоинств ВЭС стимулирующая к выбору технологий производства *ЭлЭн,* замещающих органическое топливо и восполняющая при его экспортной реализации затраты по оплате *ЭлЭн* ВЭС и приносящее дополнительный доход стране.

► дан сравнительный анализ экономических показателей вновь строящихся ГазЭС и ВЭС.

Слайд 29.

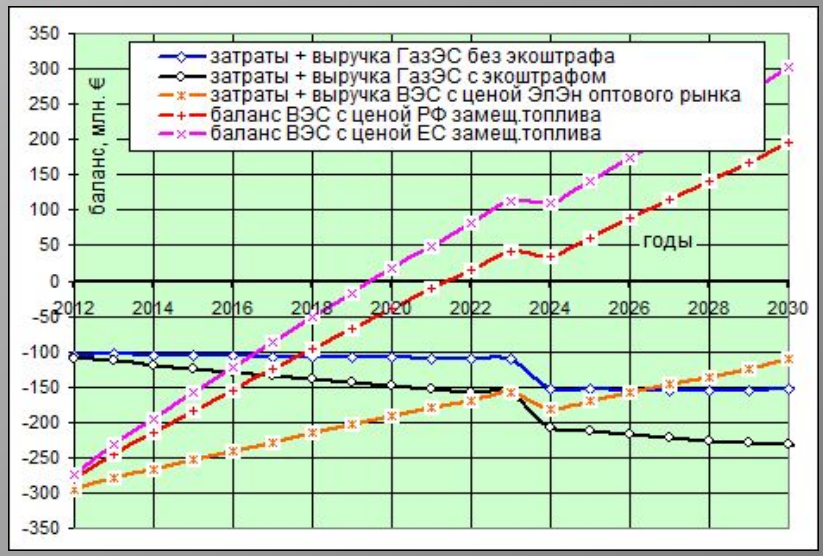
Сравнения экономических показателей ВЭС и ГазЭС

Сценарий :	70% от цен ЕС	
Показатель	ГазЭС	ВЭС
Номинальная мощность ЭС, МВт	100	183.33
$К_{инм}$, %	55	30
Присоединение к сети, млн. €	-10.05	-18.33
Капитальные затраты, млн. €	-126.7	-304.4
Затраты на эксплуатацию, млн. €	-136.1	-140.6
Затраты на газ, млн. €	-319.6	0
Экспортная цена газа, млн. €		343.9
Экоштраф за выброс CO_2, млн. €	-81.4	0
Выручка за ЭлЭн, млн. €	347.7	347.7
Баланс расходов и выручки, млн. €	-244.8	-115.7
Себестоимость ЭлЭн ЭС, €/кВт·ч	0.067	0.052
Топливная составляющая, %	52.1	0
купаемость по цене замещ.газа, лет	нет	10.2

ВЭС от ГаЭС

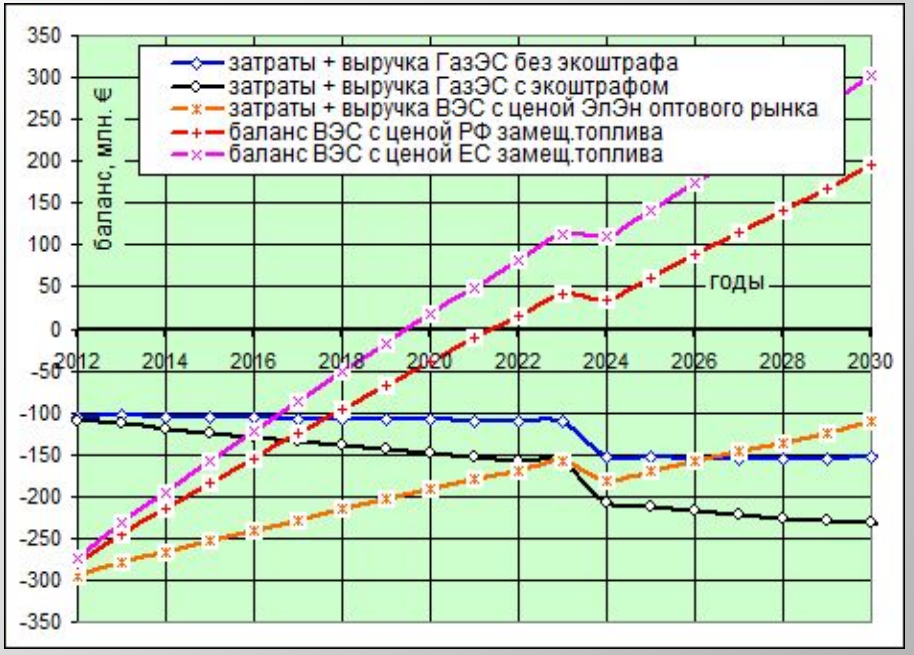
- **меньший $К_{ИУМ}$ (30% против 55%)**
- **большие капзатраты (в 2,5 раза)**
- **безтопливность (стоимость газа для ГазЭС при равнодоходных ценах газа ≈170 €/т к 2013 г. = при расх. 200 Г/кВт·ч > капзатрат на ВЭС)**
- **отсутствие экоштрафа (≈ 25% от цены газа)**

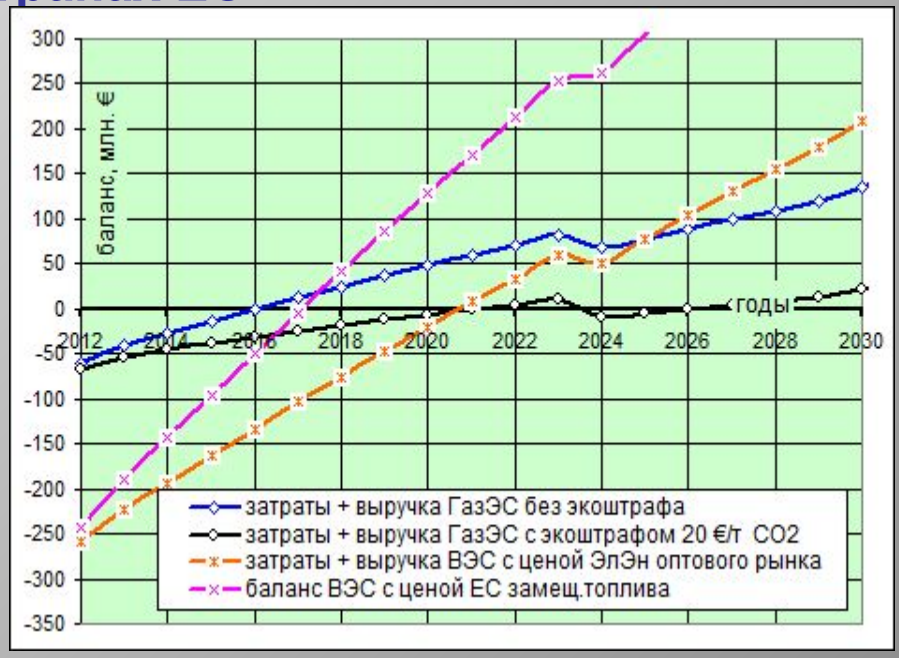
По расчетам: себестоимость *ЭлЭн* ВЭС ниже чем у ГазЭС (52 €/МВт·ч против 67 €/МВт·ч). При закупке ЭлЭн ВЭС и ГазЭС по ценам оптового рынка России (≈ 35 €/МВт·ч) ВЭС и ГазЭС не окупаемы. Новые ГазЭС окупятся при цене *ЭлЭн* ≈70 €/МВт·ч



Слайд 30.

Сравнения экономических показателей ВЭС и ГазЭС в России и странах ЕС



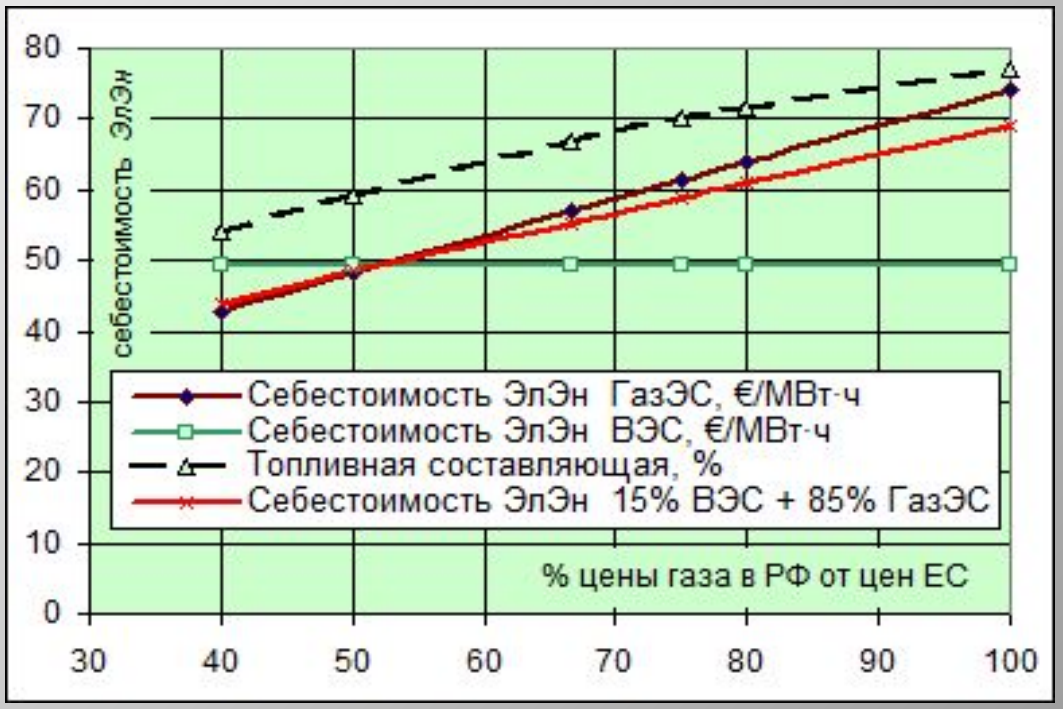


► **В отсутствии в настоящее время массового строительства новых тепловых ЭС цены на *ЭлЭн* на оптовом рынке в России (≈ 30 – 35 €/МВт·ч) определяют старые ЭС (давно амортизированные), составляющие основную часть энергопарка России => отсутствие строительства новых ЭС.**

► **Окупаемость тепловых станций в странах ЕС достигается за счет меньших капзатрат (600 – 700 €/кВтч), больших цен оптового рынка (60 – 70 €/МВтч) и скрытых субсидий тепловой генерации**

Слайд 31.

Сравнения себестоимости электроэнергии $C_{ЭлЭн}$ ВЭС и ГазЭС



- **С ростом цен на газ с сегодняшних до равнодоходных себестоимость электроэнергии ГазЭС будет расти с 40 до 57 – 65 €/МВт•ч, а у ВЭС она сохраняется ≤ 50 €/МВт•ч при $К_{ИУМ}$ = 30%**
- **Таким образом, замена части ГазЭС на ВЭС – способ снижения себестоимости выработки электроэнергии в стране и => тарифов**
- **Эффект снижения себестоимости электроэнергии в стране растет с увеличением доли ВЭС**

Слайд 32.

Оценка производственных возможностей и темпов развития отрасли ВЭС

Технологические ограничения темпов ввода ВЭС

й опыт:

ке Государств доли ВЭС

нерации стран

- 13%

я

ет

ития мировых

тся

ия)

ВЭС

13,8 ГВт

вития

ВЭС в РФ выбраны в Проекте

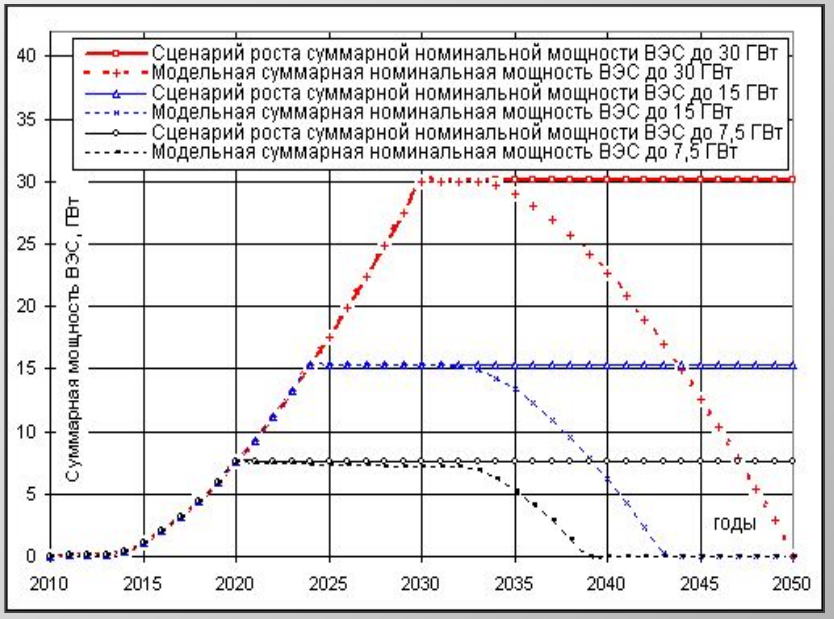
с учетом технологических, экономических и кадровых ограничений и мирового опыта и соответствуют умеренным темпам развития ВЭ в Индии и Испании

Слайд 33.

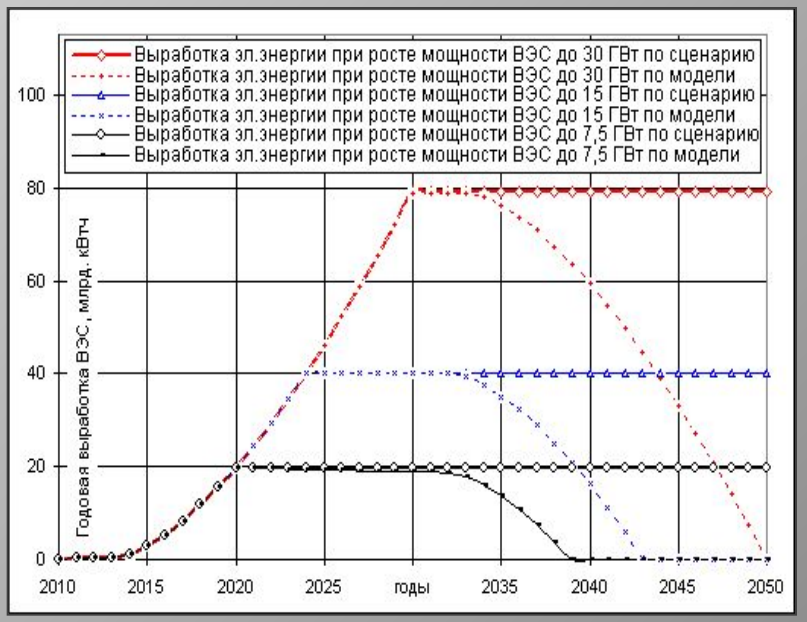
Проект широкомасштабного развития ВЭН в России

- Рост установленной мощности и выработки электроэнергии ВЭС в РФ

Мощность, ГВт



Выработка, млрд. кВтч



Не меньше, так как теряем возможности

- ► выполнения Распоряжения р-1 98.01.09
- ► быстрого роста выработки дешевой энергии
- ► сдерживания тарифов на энергию
- ► снижения выбросов CO_2
- ► экономии органического топлива
- ► увеличения прибыли от экспорта топлива
- ► в инновационном развитии

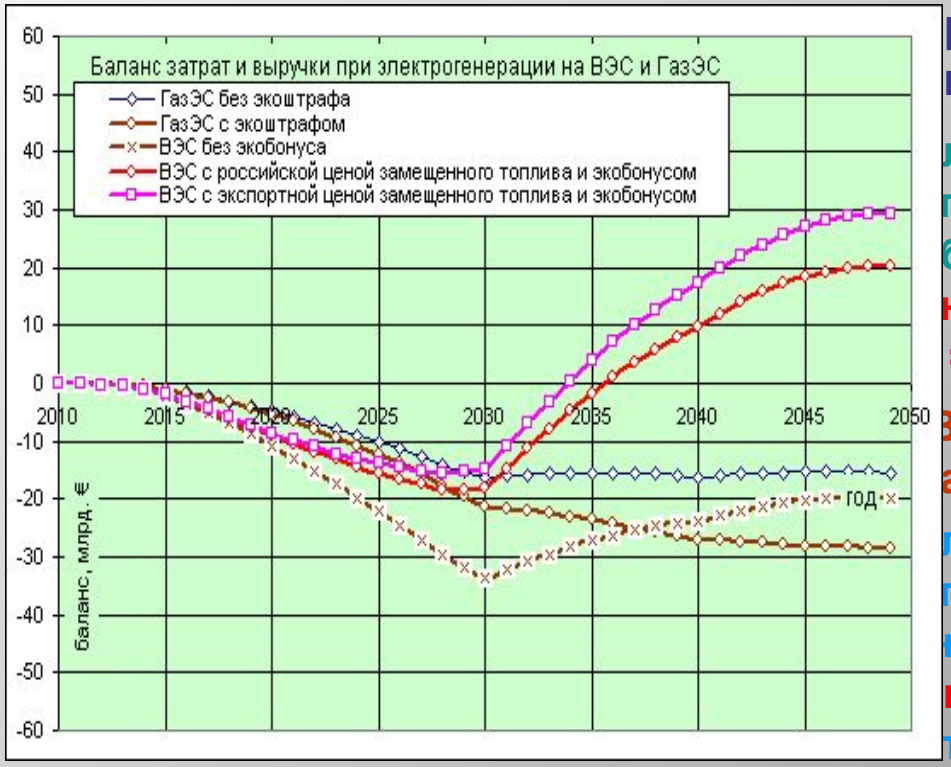
То есть: ЧЕМ БОЛЬШЕ, ТЕМ ВЫГОДНЕЕ

Не больше, так как не хватит

- ► политической воли Государства
- ► времени
- ► финансирования
- ► специалистов
- ► мощностей производства ВЭУ
- ► ветровых ресурсов и земли
- ► надежности электрических сетей

P. S.: МОЖЕТ НЕ ХВАТИТЬ и на 7 ГВт

Слайд 34 Накопление за 40 лет доходов, расходов и балансов при реализации проектов ВЭС 30 ГВТ ($К_{ИУМ}$ = 30%) и ГазЭС 18 ГВТ ($К_{ИУМ}$ = 50%) к 2030г. при “равнодоходном” сценарии



ртной выручкой
газ

льный баланс
ть до минимума
будет нарастать,
ные деньги !)
≈ 40 млрд.€)

ЭС с российской выручкой
аз

льный баланс
ть до минимума
нарастая к 2036 г.
инные деньги !)
т ≈ 17 млрд.€)

- В случае ВЭС – источник погашения отрицательного баланса – распределение прибыли от экспорта газа
- О надбавках !!!. ”Справедливая”надбавка за эл.энергию ВЭС = российской цене замещенного газа, действующая весь срок службы ВЭС (≈20 лет):

позволяет окупить ВЭС за 11 – 13 лет и заставляет “хозяина” ВЭС максимально использовать ее технические возможности и ресурс.

Слайд 35.

Энергетический, экологический, экономический, социальный эффекты проекта 30 ГВт

•	2020 г.	2030 г.
Суммарная мощность ВЭС	7 ГВт	30 ГВт
$К_{ИУМ}$ ВЭУ	28%	30%
Годовая выработка электроэнергии	17,5 ТВт·ч	79 ТВт·ч
Доля в балансе электроэнергии	1,3%	4,6%
Замещение газа	6 млрд.$м^3$	27 млрд.$м^3$
Стоимость замещенного газа в РФ сегодня	440 млн.€	2,0 млрд.€
Стоимость замещенного газа в России	800 млн.€	3,6 млрд.€
Экспортная стоимость замещенного газа	1,5 млрд.€	6,8 млрд.€
Сокращение выбросов CO_2	9,6 млн.т	43,5 млн.т
Стоимость выбросов CO_2 (по 20 €/т)	192 млн.€	870 млн.€

В силу экономической заинтересованности в долгосрочной перспективе основную организационную и финансовую роль в создании отрасли ВИЭ должны сыграть Государство и крупные компаниями ТЭК, добывающие и экспортирующие топливо, и прежде всего такие, как ГАЗПРОМ, ЛУКОЙЛ и др.

Слайд 36

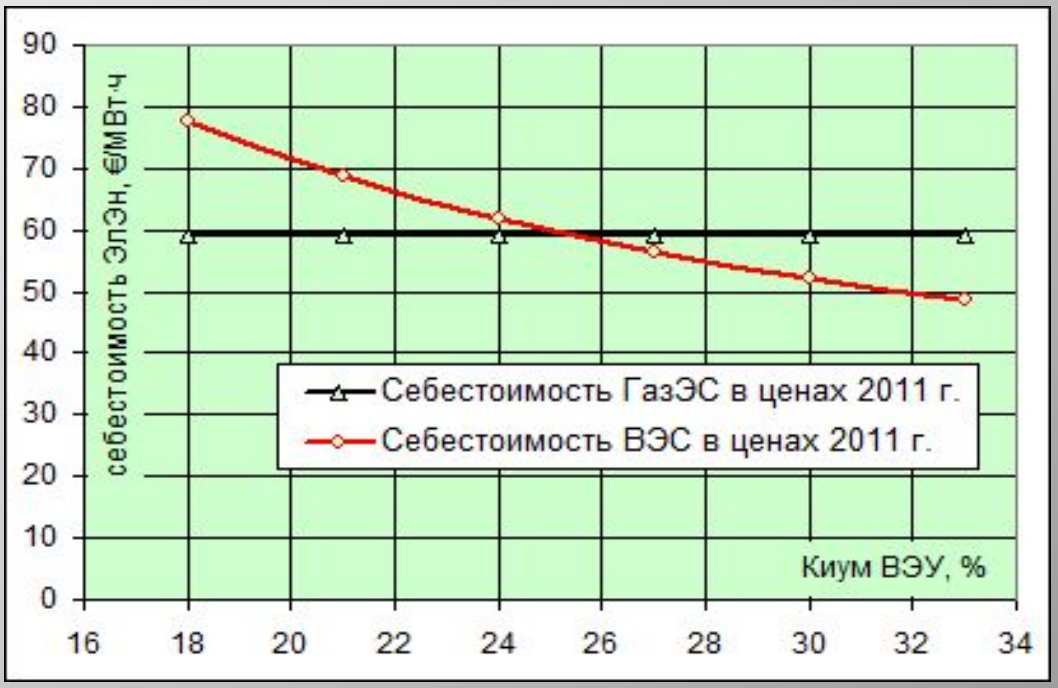
Разработка проекта Генсхемы размещения ВЭС в России

В качестве принципов и критериев предлагается:

1) **ВЭС строить в местах потребления энергии и ее дефицита (большинство субъектов Российской Федерации)**
2) **ВЭС строить в технологически допустимых количествах и темпе (20% от мощности выработки субъекта РФ и соседних с ним)**
3) **планировать рост мощностей ВЭС с учетом мировой практики**
4) **ВЭС строить там, где они экономически выгоднее прочих ЭС**
5) **ВЭС строить в местах развитой дорожной и сетевой инфраструктурой**
5) **ВЭС строить в местах, обеспеченных достаточными ВЭР (ориентация на посевные площади в степных зонах в лесополосах)**

Слайд 37.

ВЭС экономически выгоднее ГазЭС при $К_{ИУМ}$ > 30% (с запасом ≈ 20% !)



По Генеральной схеме ВЭС строим в местах, обеспеченных ВЭР ($К_{ИУМ}$ > 30%)

$$К_{ИУМ} = P_{РАСП} / P_{НОМ}, \quad \text{где} \quad P_{РАСП} = К_{НЕИД} \cdot К_{ТГ}(n) \cdot \int_{V_o}^{V_{БУР}} p(V) \cdot f(V)\, dV, \quad \text{где}$$

$P_{РАСП}$ и $P_{НОМ}$ – располагаемая и номинальная мощность ВЭУ; $К_{НЕИД}$ и $К_{ТГ}(n)$ – коэффициенты неидеальности и технической готовности ВЭУ и n – номер года эксплуатации ВЭУ; $p(V)$ и $f(V)$ – рабочая характеристика и функция плотности вероятности распределения скорости ветра; $V_{БУР}$ и V_o – скорости буревого отключения и страгивания ВЭУ.

Слайд 38. Перспективные районы и возможные объемы использования ВЭС в РФ до 2020 г.

№	Субъекты Российской Федерации	Место возведения ВЭС	Установленная мощность ВЭС, МВт
Центральный АО			
1	Белгородская область	Степные районы	100
2	Брянская область	Вдоль ж.д Брянск – Гомель	100
3	Воронежская область	Вдоль ж.д Воронеж – Ростов	50
4	Калужская область	Вдоль трассы Калуга – Сухиничи	200
5	Курская область	Окресности г. Курск	100
6	Московская область	Дмитровский район	100
7	Смоленская область	Район Смоленска	200
8	Тверская область	Район г. Бологое	150
ИТОГО			**1000**
Северо-Западный АО			
1	Архангельская область	Побережья Баренцева и Белого морей	150
2	Калининградская область	Висленская коса, побережье Балтики	200
3	Республика Коми	Побережье Баренцева моря	100
4	Ленинградская область	Побережье Балтийского моря	300
5	Мурманская область	Побережья Баренцева и Белого морей	600
6	Ненецкий АО	Побережье Баренцева моря	50
7	Республика Карелия	Побережье и о-ва Белого моря, Валаам	100
ИТОГО			**1500**
Южный АО			
1	Астраханская область	Прикаспийские районы	200
2	Волгоградская область	Р-н Волжской ГЭС, Камышин, побережье Цимлянского моря	600
3	Республика Кабардино-Балкария	Север республики	50
4	Республика Калмыкия	Побережье Каспийского моря, Элиста	200
5	Республика Карачаево-Черкесия	Север республики	50
6	Краснодарский край	Побережье Азовского и Черного морей	600
7	Ростовская область	Побережье Азовского моря	200
8	Ставропольский край	Армавирский коридор	150
ИТОГО			**2050**

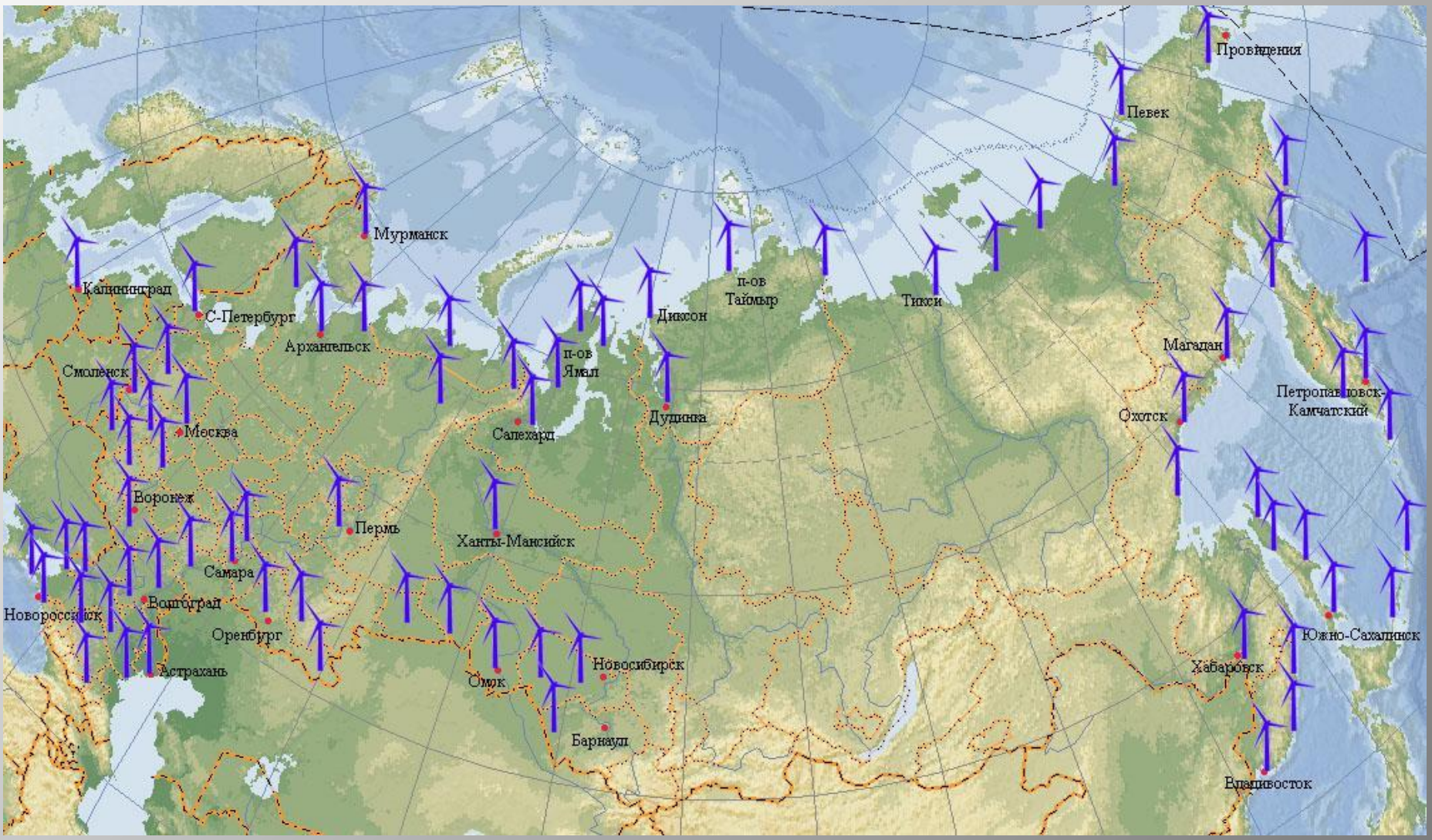
Слайд 39.

Перспективные районы размещения ВЭС (предложение к Генсхеме размещения ВЭС РФ).

Приволжский АО		
Республика Башкортостан	Южные степные районы	50
Оренбургская область	Южные степные районы	100
Пермский край	Безлесные районы	150
Самарская область	Побережье Куйбышевского вдхр.	100
Саратовская область	Побережье Саратовского вдхр.	150
Ульяновская область	Побережье Куйбышевского вдхр.	100
ИТОГО		**650**
	Уральский АО	
Курганская область	Вдоль Западно-Сибирской ж.д.	200
Ямало-Ненецкий АО	В местах добычи газа	400
ИТОГО		**600**
Сибирский АО		
Алтайский край	Кулундинская степь	100
Новосибирская (Барабинская степь)	Вдоль Западно-Сибирской ж.д.	300
Омская область	Вдоль Западно-Сибирской ж.д.	400
ИТОГО		**800**
Дальневосточный АО		
Камчатская область	Побережье Охотского и Берингова морей	200
Магаданская область	Побережье Охотского моря	100
Приморский край	Побережье Японского моря	150
Сахалинская область	Побережье, Курильские о-ва	300
ИТОГО		**750**
ИТОГО по РФ		**7 350**

Слайд 40.

Перспективные районы размещения ВЭС (предложение к Генсхеме размещения крупных ВЭС в России).



Слайд 41.

Положения, выносимые на защиту:

1. Автором разработана методология и реализующая ее информационно-аналитическая и численная методика определения и анализа ВЭП и энергетической эффективности ВЭС известных типов в заданной месте или районе с погрешностью < 12–15% для равнинных и 18–24% для сложных по рельефу и подстилающей поверхности территорий, что минимум вдвое точнее других известных аналитических методик. Методика близка по точности к требуемой за рубежом 10%-ной точности обоснования инвестиций проектов ВЭС (достигаемой с использованием экспериментальных и аналитических методов), но в 3–4 раза эффективнее зарубежных по затратам времени и средств.

2. Выбор определяющих энергетическую и экономическую эффективность ВЭС технических параметров и типов базовых ВЭУ, а также их использования в гибридных (ветро-дизельных, ветрокриогенных) должен производится с учетом характеристик ВЭП, существенно меняющихся по территории РФ.

3. Результаты исследований, полученные с использованием разработанных автором методик, доказывают, что в России имеются все (за исключением правовой базы) необходимые ресурсные, технические, энергетические и экономические условия для широкомасштабного эффективного использования ВЭС. При этом:

Слайд 42.

Положения, выносимые на защиту:

3.1) технический ВЭП РФ превышает 11500 млрд кВт·ч/год (в 11,5 раз больше потребления *ЭлЭн* в стране), ВЭП Центрального, Северо-Западного, Приволжского и Южного ФО, где проживает 73% населения РФ, составляет не менее 3450 млрд кВт·ч/год;

3.2) энергетический потенциал ВЭС, вырабатывающих *ЭлЭн* с меньшей на 18-20% себестоимостью, чем наиболее экономичные в настоящее время ТЭС на газе, превышает 1100 млрд кВт·ч/год (больше современного потребления *ЭлЭн* в РФ);

3.3) с учетом установленных в работе технологических и производственных ограничений суммарные установленные мощности ВЭС в РФ к 2020 и 2030 годам могут составлять до 7 и 30 ГВт соответственно с годовой выработкой не менее 17,5 и 80–85 млрд кВт·ч/год с ее долей до 5–6% от потребления *ЭлЭн* в стране в 2030 г.

3.4) годовое замещение газа в РФ при работе ВЭС суммарной мощности 30 ГВт может составить 30–35 млрд $м^3$ при сокращении выбросов в атмосферу CO_2 40–50 млн т.

3.5) целесообразные масштабы эффективного использования ВЭС составляют: в ТЭК – до 30 ГВт, на транспорте – до 17 ГВт, в АПК – не менее 1,9 ГВт;

Спасибо за внимание.

Тел./факс: 8-499-744-41-63, **E-mail:** atmograph@gmail.com