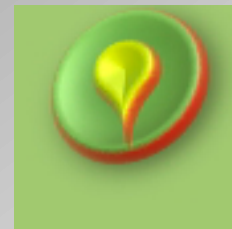


МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС REENCON XXI



«Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность»

Г. Москва, Сколково
13 – 14 октября 2016 года

ДОКЛАД

Научно-информационного Центра «АТМОГРАФ», Москва, Россия

О необходимости и возможности обновления атласа ветров России и стран СНГ

Докладчик: Николаев Владимир Геннадьевич,
д. т. н., чл.- корр. РИА, директор НИЦ «АТМОГРАФ»



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



Основные направления деятельности НИЦ “АТМОГРАФ” (с 1996 г.):

• авиация и космос:

моделирование параметров атмосферы – внешних условий полета; планирование авиационных маршрутов и эшелонов; безопасность взлета-посадки, регулярность и экономическая эффективность авиационных перевозок; международная (ИСО/ТК 20/ПК 6) и государственная стандартизация;

• малая и возобновляемая энергетика:

- определение ветровых и солнечных энергоресурсов на территории РФ и стран СНГ;
- расчет энергетической и экономической эффективности использования ветровых, солнечных и гибридных и традиционных энергоустановок и оборудования;
- выбор и реализация оптимальных вариантов энергоснабжения;

• строительство:

ветровые нагрузки на здания и сооружения, аэрация городов; пассивное энергоснабжение и энергосбережение;

• экология:

распространение загрязнений в атмосфере, трансграничные переносы;

• образование, информационно-справочное обеспечение, распространение и пропаганда знаний и передовых технологий в указанных областях

Одно из препятствий для развития эффективной российской ветроиндустрии – недостаточно адекватное представление о ветроэнергетическом потенциале (ВЭП) России

- Одновременно российской информационной среде сосуществуют несколько источников различающихся данных о территориальном, высотном и временном распределении ВЭП России и его количественных параметрах :

– Русско-датский Атлас ветров России (А.Н. Старков, Л. Лансберг, П.П. Безруких, М.М.Борисенко. М. “Можайск-Терра”, 2000.

– Справочник по ресурсам ВИЭ России и местным видам топлива (Безруких П.П., Елистратов В.В., Панцхава У.С., Тарнижевский Б.В. и др. – М.: “ИАЦ Энергия”, 2007)

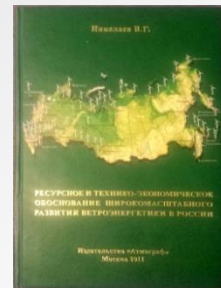
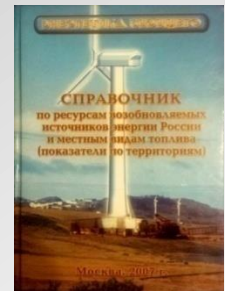
– Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России (Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. М.: ОИВТ М.: ОИВТ РАН, 2015.

– Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов РФ и методические основы их определения. (Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. “Атмограф”, М., 2008)

– Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. (Николаев В.Г., “Атмограф”, 2011)

- Сведения, содержащиеся в этих и других источниках получены разными методиками, по разным эмпирическим данным (метеорологическим, аэрологическим, спутниковым), описывают разные наборы характеристик ВЭП, и часто значительно различаются количественно и качественно.

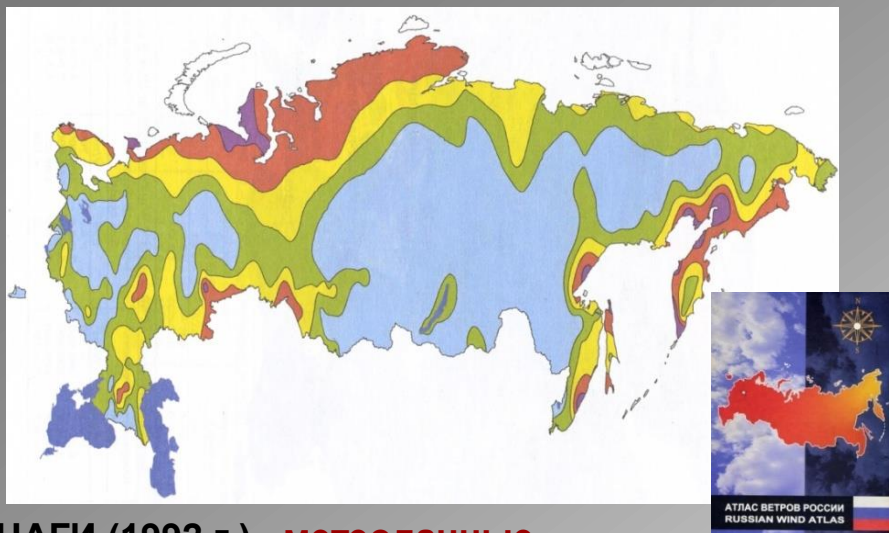
- Соответственно, они по разному отвечают на вопрос: **Есть ли ветер в России ?**



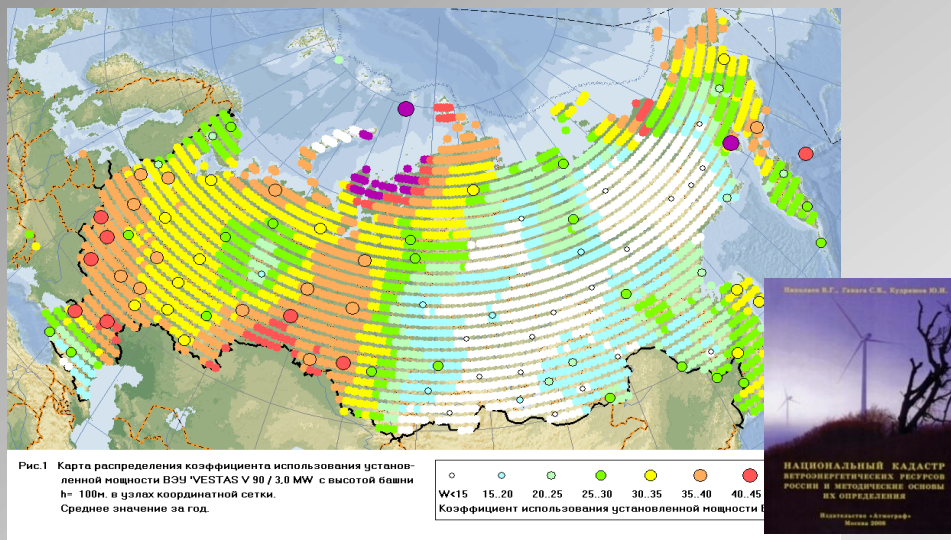
Знание о ветровых ресурсах России развивалось с накоплением данных

RISO (2000 г.) метеоданные 220 МС СССР

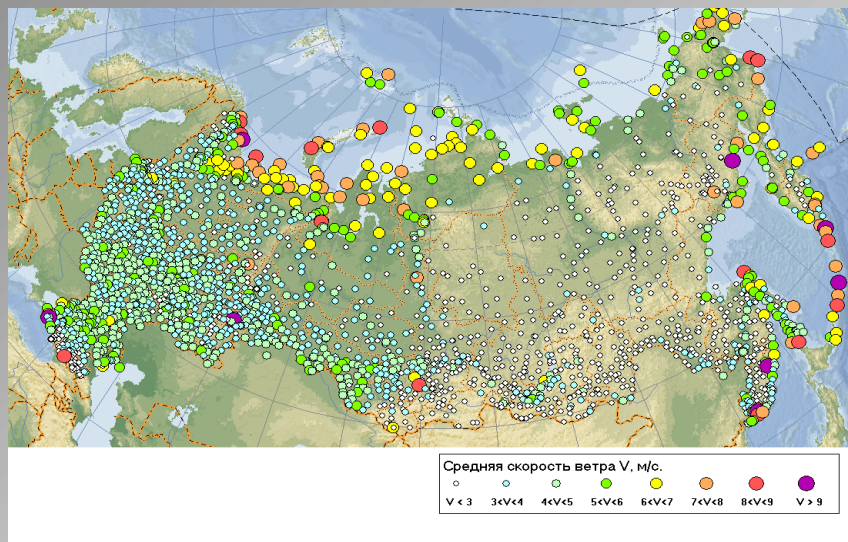
ФЛЮГЕР (2009) данные 2200 МС + 147 АС СССР



ЦАГИ (1992 г.) метеоданные 3600 МС СССР

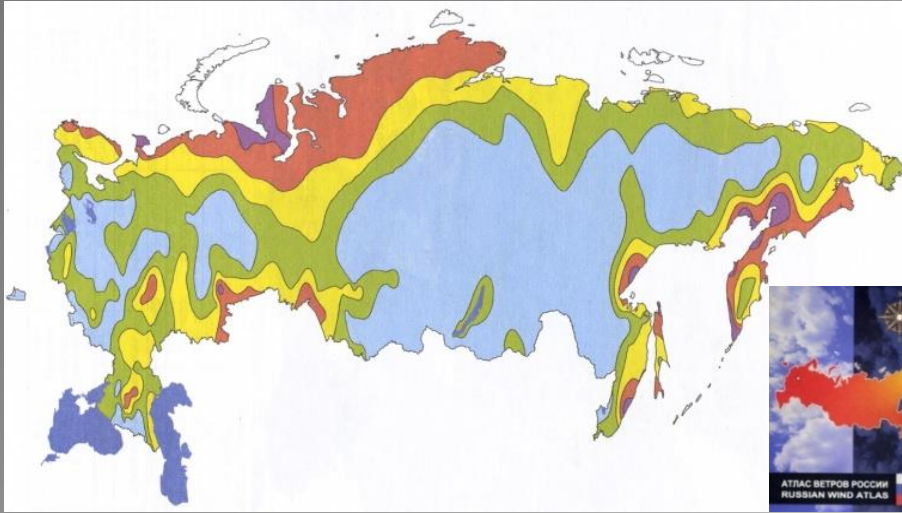


МГУ (2010 г.) Спутниковые данные NASA



На наиболее достоверные и эффективные для России претендуют методики “ФЛЮГЕР XXI” (© “АТМОГРАФ” и WASP (RISO, Дания), наиболее авторитетная в мире, активно распространяемая в России в ПП WindFarmer, Resoft ... – база Атласа ветров

Механизм поддержки ВЭС основан на устаревшем представлении о территориальном распределении ветровых ресурсов в России



Наиболее авторитетная и достоверная международная теоретическая методика **WASP** – основа русско-датского Атласа ветров России (2000 г.) – **недостаточно точна для определения ВЭП** на высотах более 40 – 50 м (занижает экспериментальные значения ВЭП) и, тем самым, **ограничивает перспективы эффективного использования ВЭС в России до 4 – 5 ГВт а реально (!!!)**

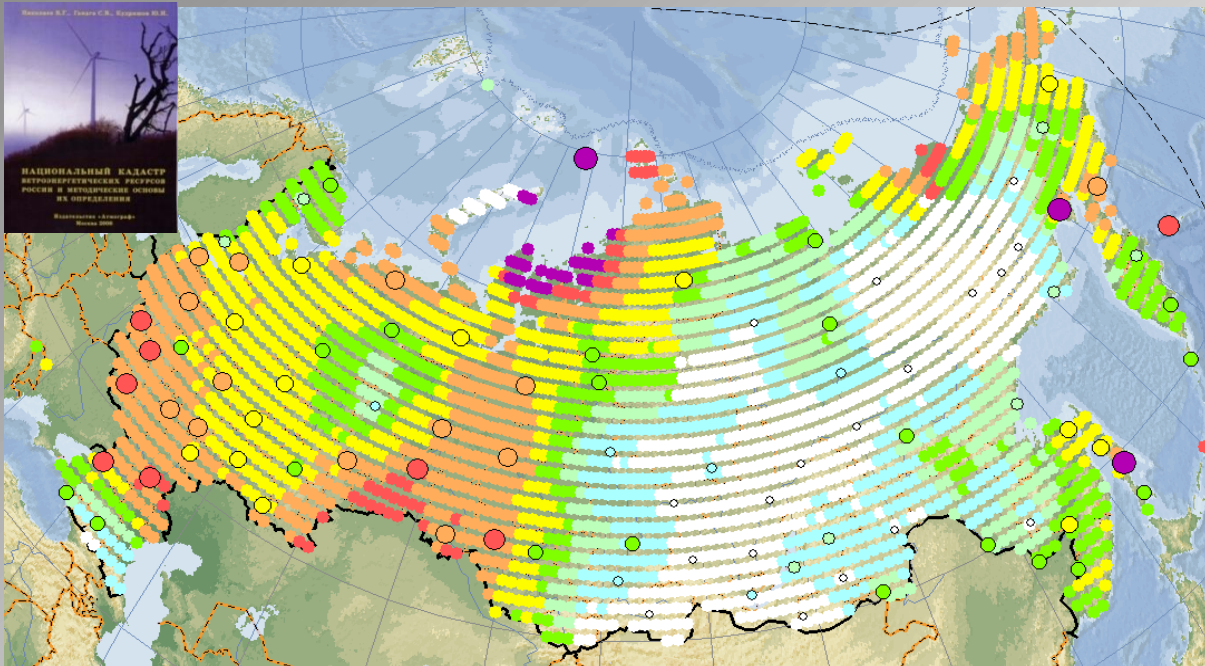


Рис.1 Карта распределения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ 'VESTAS V 90 / 3,0 MW с высотой башни h= 100м. в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.

◇	○	○	○	○	○	○	○	○
W<15	15..20	20..25	25..30	30..35	35..40	40..45	W>45	
Коэффициент использования установленной мощности ВЭУ, %								

↓
Распределение по России $K_{иум}$ (%) ВЭУ V90 ($D_{ВК}=90$ м, $H=100$ м)

Желтым и красным окрашены территории с ветропотенциалом (ВЭП), достаточным для его эффективного коммерческого освоения по всем международным критериям ($K_{иум} \geq 30\%$)

Технический ВЭП таких территорий ≈ 3500 млрд кВт·ч

Экономический ≈ 35 ГВт или ≈ 90 млрд кВт·ч

На территориях с $K_{иум}$ более 30% проживает $\approx 73\%$ россиян

Теоретическая методика высокоточного определения ВЭП и мощности ВЭС, используемая для построения Атласа России и стран СНГ и Балтии.и

Кардинальное повышение достоверности методики моделирования ВЭП и $P_{ВЭУ}$ в России (с погрешностью $\leq 10-14\%$ для равнин и $\leq 18-25\%$ – для сложного рельефа) обеспечивается новыми методическими подходами определения $\int p(v) \cdot f(v) dv$ в

$$P_{ВЭС} = K_{ТГ}(n) \cdot K_{НИД} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{S_{ВК}} \int_{V_0}^{V_{БУР}} p(v) \cdot f(v) dv = K_{ТГ}(n) \cdot K_{НИД} \cdot \sum_{n=1}^N p(V_n) \cdot G(V_n)$$

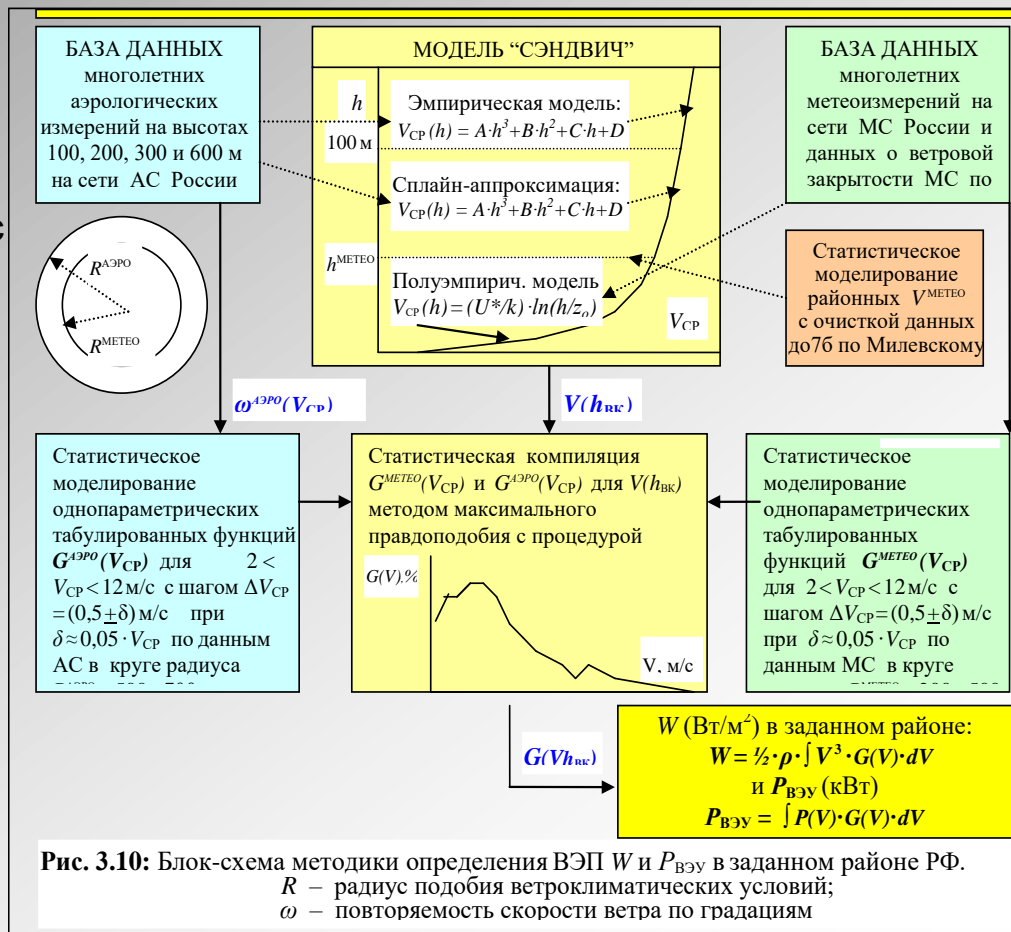
1. Аппроксимация нелинейности $\int p(v) \cdot f(v) dv$ прогноза $P_{ВЭУ}$, используя статистически установленные полиномиальные связи

$$P_{ВЭУ}(V_{СР}) : \int p(v) \cdot f(v) dv = \sum A_K \cdot V_{СР}^K + O(\text{проч.})$$

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 $V(100-600 \text{ м})$.

3. Характеристики ветра на $h^{МЕТЕО}$ и $h^{АЭРО}$ вместо данных одной ближайшей МС и АС статистически 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 $G(V_i)$ вместо данных ветровой разведки и ближайшей МС (в зарубежных методиках) определяются по данным МС и АС района в радиусе до 500 км от ВЭС.

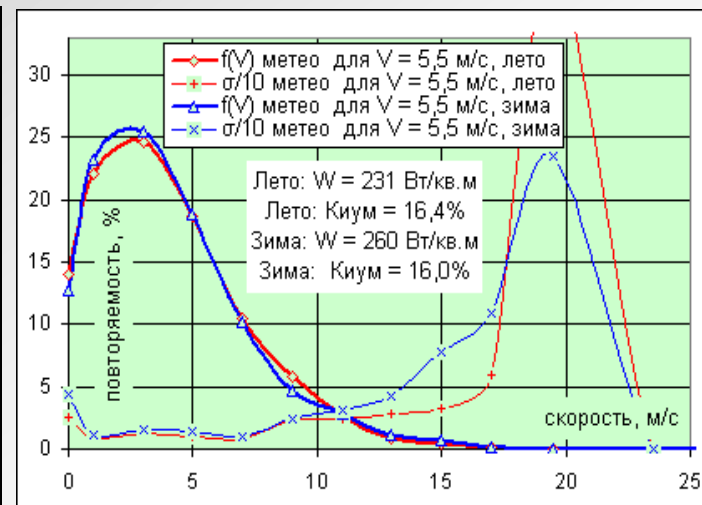


Принципиальная новизна, обеспечивающая эффективность определения ВЭП и ВЭУ по методике НИЦ "АТМОГРАФ"

Статистическое моделирование функций плотности вероятности распределения $G(V)$ по эмпирическим повторяемостям ветра по данным МС

Архангельск, $G(V)$ для зимы по данным метеорологических станций в радиусе $R = 600$ 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	$\sigma_{P_{вэу}}$, %	
	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



Методика ФЛЮГЕР XXI построена на использовании развитой авторами трехслойной модели $V(h)$ “Сэндвич”, описываемой **выше 100 м** кубической аппроксимацией средних многолетних сезонных данных АС на высотах 100, 200, 300, 600 м.

В слое **0 – h^{Log}** $V(h)$ моделируется предложенной авторами логарифмической функцией вида:

$$V(z) = A \cdot \ln(1 + B \cdot h) \quad (2),$$

описывающей профиль $V(h)$ в слое от 0 до некоторой априори неизвестной высоты h^{Log} , выше которой и до высоты 100 м (первый аэрологический уровень) профиль $V(h)$ аппроксимируется эллиптическими функциями с коэффициентами, определяемыми из условий гладкой сшивки с профилями на границе с нижним и верхним слоем, моделируемым кубическим сплайном.

Коэффициенты A и B в функции (11) и высота H^n , определяются по метеоданным о скорости ветра из условия минимума толщины вытеснения импульса δ^{**} , определяемого варьированием высоты h^{Log} , и означающего минимум трения ветрового потока о поверхность.

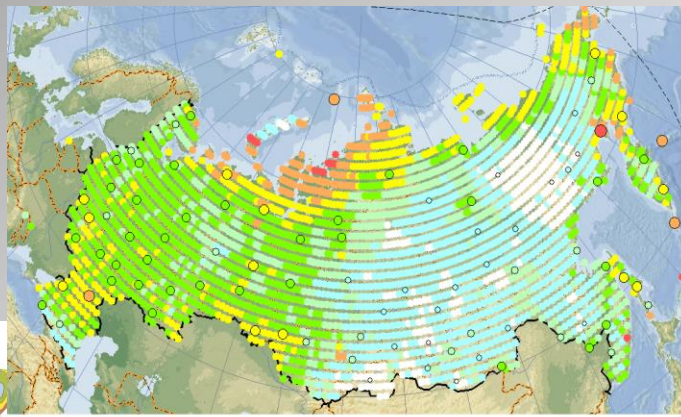
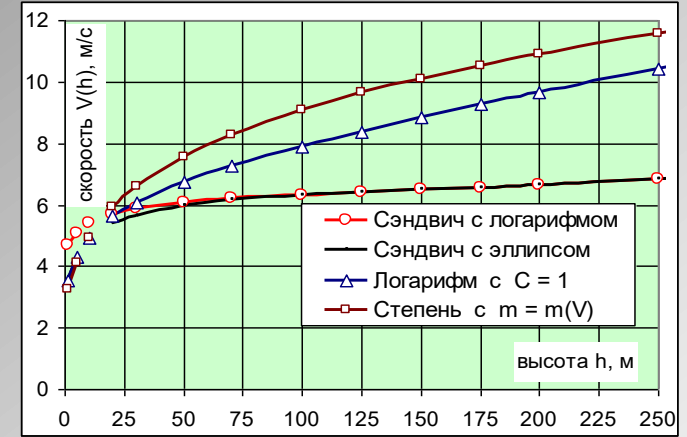


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте $h=33$ м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.

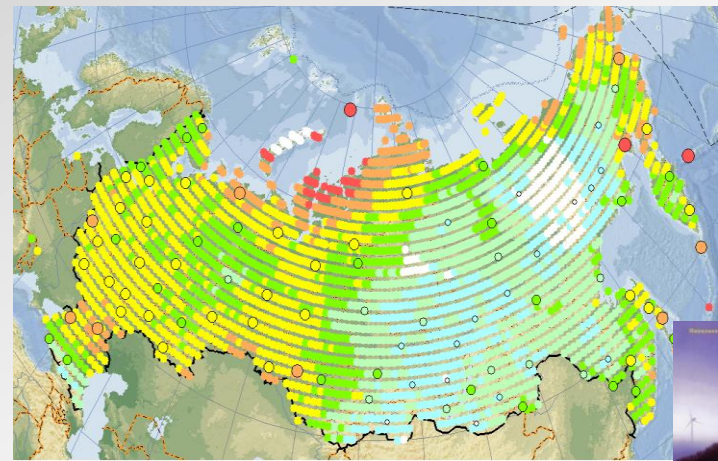


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте $h=50$ м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.



- Сопоставление плотности энергетической сети России и территориального распределения среднегодового коэффициента использования номинальной мощности ВЭС Vestas V 90 $K_{иум}$ (%)

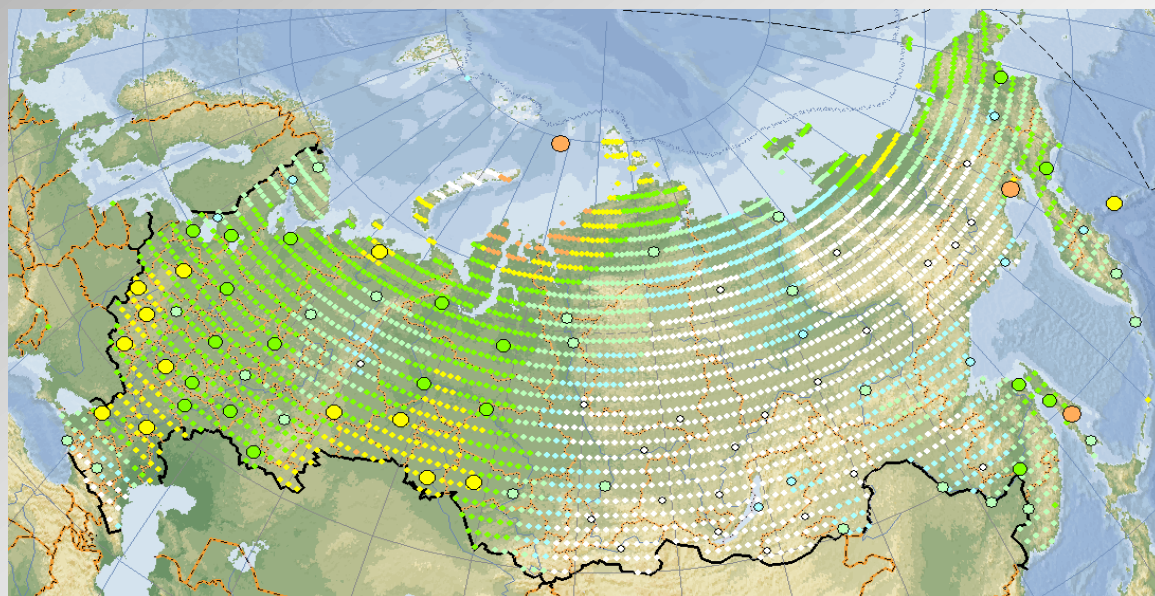


Рис.1 Карта распределения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ VESTAS V 90 / 3.0 MW с высотой башни $h = 100$ м. в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.



В НИЦ АТМОГРАФ разработана и использована при разработке Нового Атласа трехслойная модификация модели "Сэндвич" на базе нового класса логарифмических функций вида: $V(z) = A \cdot \ln(1 + B \cdot h)$ (2), аппроксимирующих профиль $V(h)$ в слое от 0 до некоторой априори неизвестной высоты H^{Log} , выше которой и до высоты 100 м (первый стандартный аэрологический уровень) $V(h)$ аппроксимируется эллиптическими функциями с коэффициентами, определяемыми из условий гладкой сшивки с профилями на границе с нижним и верхним слоем, моделируемым кубическим сплайном.

Коэффициенты A и B в функции (2) и высота H^{Log} , определяются по метеоданным (или данным ВИК) о скорости ветра из условия минимума толщины вытеснения импульса δ^{**} , определяемого варьированием высоты H^{Log} , и означающего минимум трения ветрового потока о поверхность.

Трехслойная модель "Сэндвич" $V(h)$ нового типа (2) дает наилучшее соответствие физическим представлениям о строении классического пограничного слоя: гладкости $V(h)$, наличия пристеночного слоя с линейным нарастанием скорости ветра с высотой и гипотезе авторов о реализации в ПСА профилей $V(h)$ с минимальным трением ветровых потоков о поверхность.

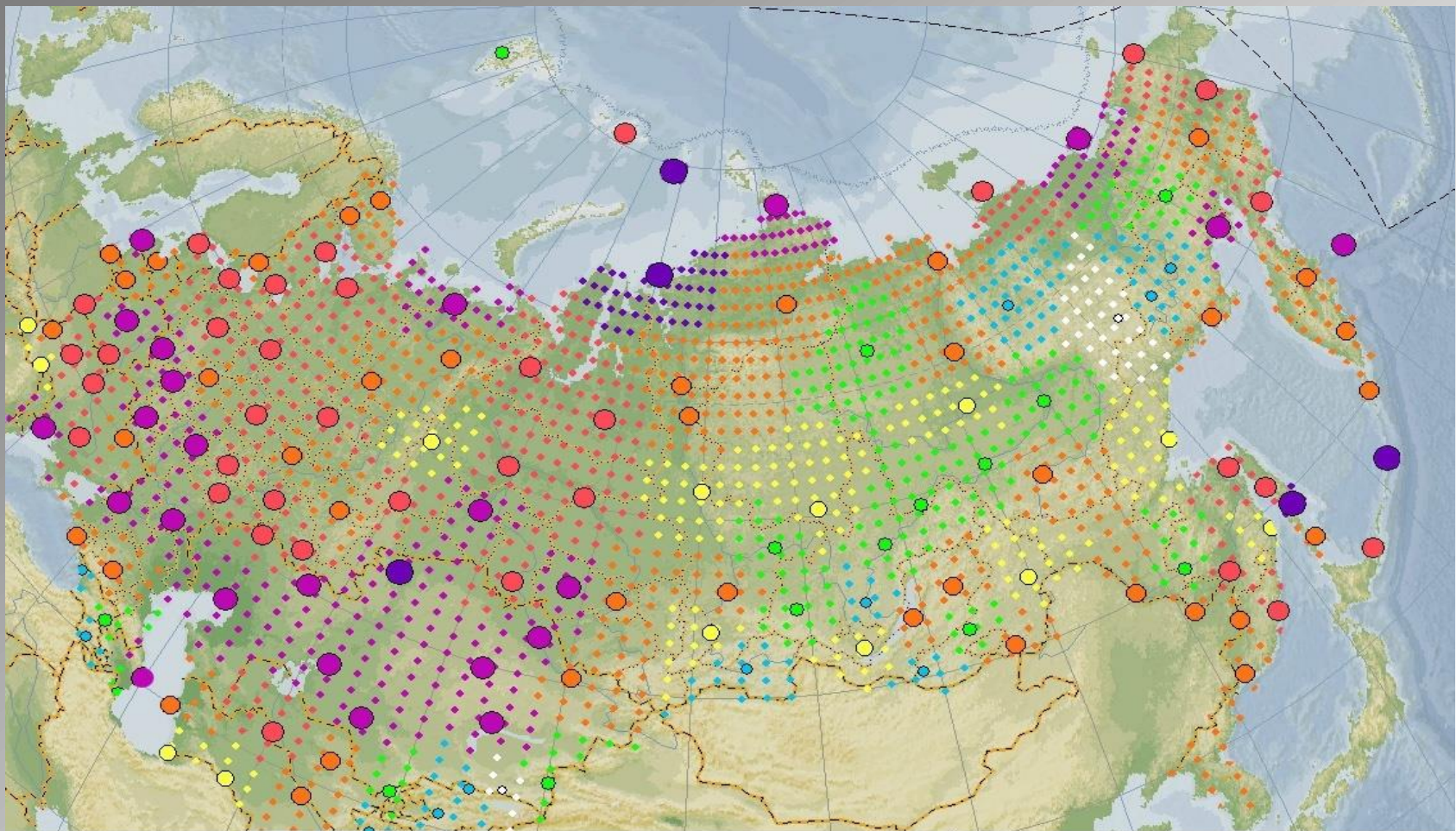
Возможность дальнейшего исследования и обоснования модели (2) авторы видят в привлечении и анализе данных многоуровневых мачтовых измерений, развитых в мире и России под решение задач ветроэнергетики.

Пункт :	о. Беринга	Брест	Волгоград	Кзыл-Орда	Николаевск-на-Амуре	Новосибирск	Тикси
<i>Модели по данным зимнего сезона</i>							
$V(h) = V^{метео} \cdot (h/h^{метео})^m, m=m(V)$	34.7	43.2	36.8	40.1	43.7	43.5	39.3
$V(h) = V^{метео} \cdot (h/h^{метео})^m, m=1/7$	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1
$V(h) = (U^*/\kappa) \cdot [Ln(h/z_o) + \psi(h/L)]$	38.3	47.3	40.0	43.5	48.1	48.4	42.4
$V(z) = (U^*/\kappa) \cdot Ln(z/z_o)$	21.9	23.7	21.9	21.9	21.9	24.6	21.9
Сэндвич-эллипс с моделью (9)	4.5	28.8	25.1	18.6	19.5	44.4	12.4
Сэндвич-эллипс с моделью (4)	7.6	29.0	24.6	19.2	19.6	44.4	16.6
Сэндвич-логарифм с моделью (13)	6.9	29.4	24.5	20.2	21.8	44.2	14.7
<i>Модели по данным летнего сезона</i>							
$V(h) = V^{метео} \cdot (h/h^{метео})^m, m=m(V)$	39.5	45.2	39.7	42.4	43.2	46.3	41.7
$V(h) = V^{метео} \cdot (h/h^{метео})^m, m=1/7$	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1
$V(h) = (U^*/\kappa) \cdot [Ln(h/z_o) + \psi(h/L)]$	43.2	49.2	43.2	46.0	47.4	50.2	45.1
$V(z) = (U^*/\kappa) \cdot Ln(z/z_o)$	26.8	30.3	26.8	26.8	26.8	34.6	26.8
Сэндвич-эллипс с моделью (9)	7.9	18.5	9.8	24.7	20.7	33.7	28.1
Сэндвич-эллипс с моделью (4)	16.2	18.7	14.9	26.9	20.0	33.8	28.4
Сэндвич-логарифм с моделью (13)	9.8	19.7	11.4	24.8	20.6	33.5	30.0

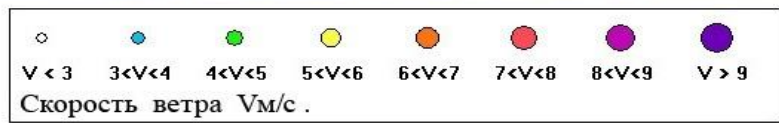


Фрагмент Атласа

Распределение по территории России, стран СНГ и Балтии скорости ветра на высоте 100 м



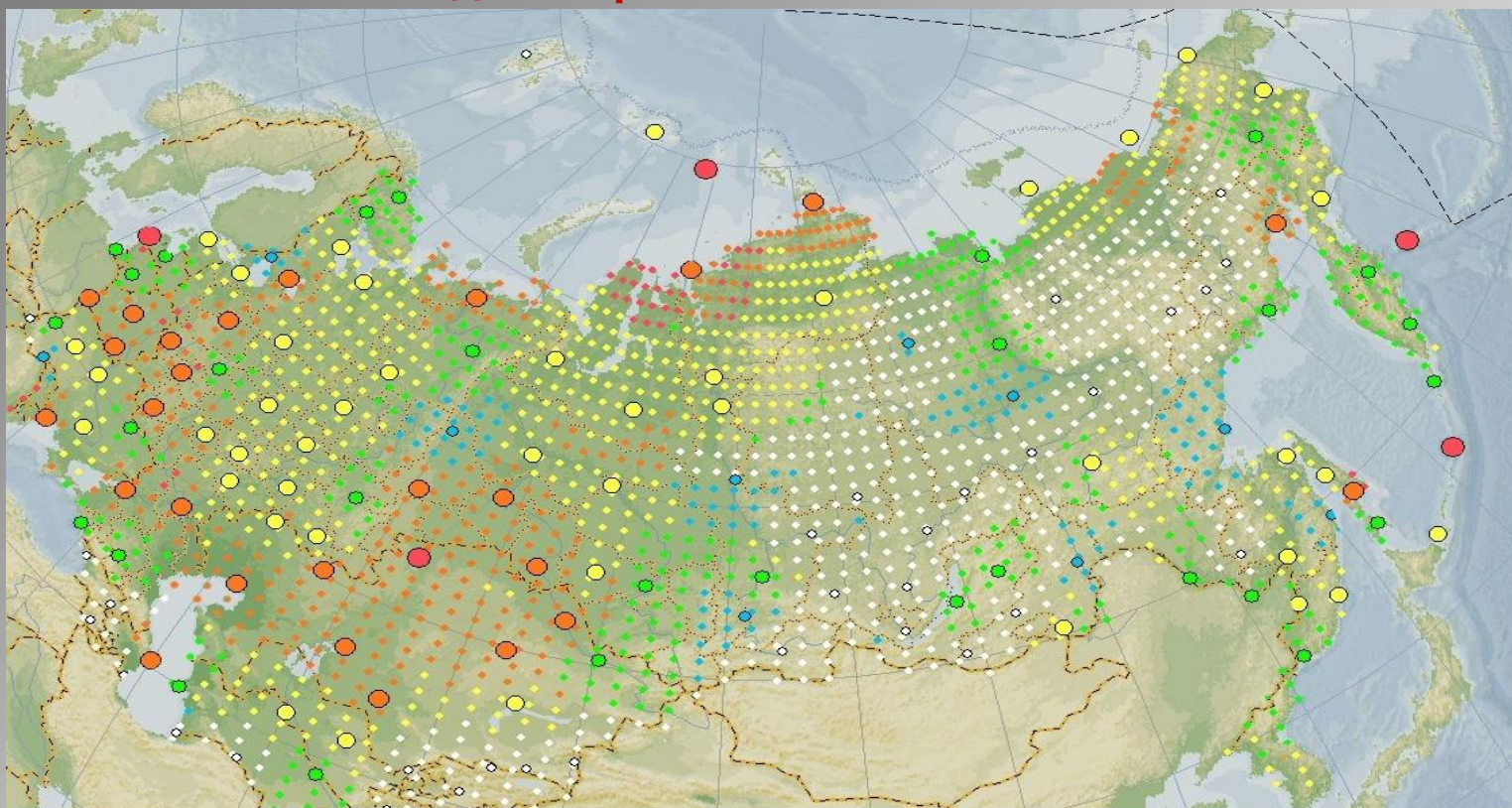
Скорость ветра на высоте 100м на территории
России, стран СНГ и Балтии. Среднегодовая.





Фрагмент Атласа

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



Коэффициент использования номинальной мощности (%)
VESTAS V-90 3МВт с высотой башни 100м на территории
России, стран СНГ и Балтии. Среднегодовой.



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

Основные выводы разработки и построения Нового ветроэнергетического Атласа России, стран СНГ и Балтии

- С учетом развития современной мировой ветротехники актуальным представляется разработка нового Атласа ветров России на основе комбинации описанных в докладе наиболее достоверных отечественных и зарубежных методик
- Информационный уровень и достоверность нового Атласа может быть усовершенствованы при комплексном использовании накопленных в России и бывшем СССР метеорологических и аэрологических данных и отечественных методических наработок
- Представляется целесообразным включение в Атлас новых характеристик ветрового потенциала: вероятности ветроэнергетического штилей и оценок энергетических показателей типовых ВЭУ в терминах $K_{иум}$ с сезонным разрешением с указанием статистических погрешностей их определения
- Разработанные авторами методические подходы и накопленные базы данных метеорологических и аэрологических измерений в пограничном слое атмосферы на территории бывшего СССР за период 1960 - 1980 гг. являются добротной основой разрабатываемого авторами нового атласа ветров, единого для территории России, стран СНГ и Балтии. Такой атлас, по мнению авторов, окажет содействие более согласованному и эффективному освоению ветроэнергетических ресурсов на территории России, стран СНГ и Балтии

**Спасибо за внимание.
Готовы к сотрудничеству.**



Тел./факс: 8-499-744-41-63

E-mail: atmograph@gmail.com

Site: <https://sites.google.com/site/atmograph/>