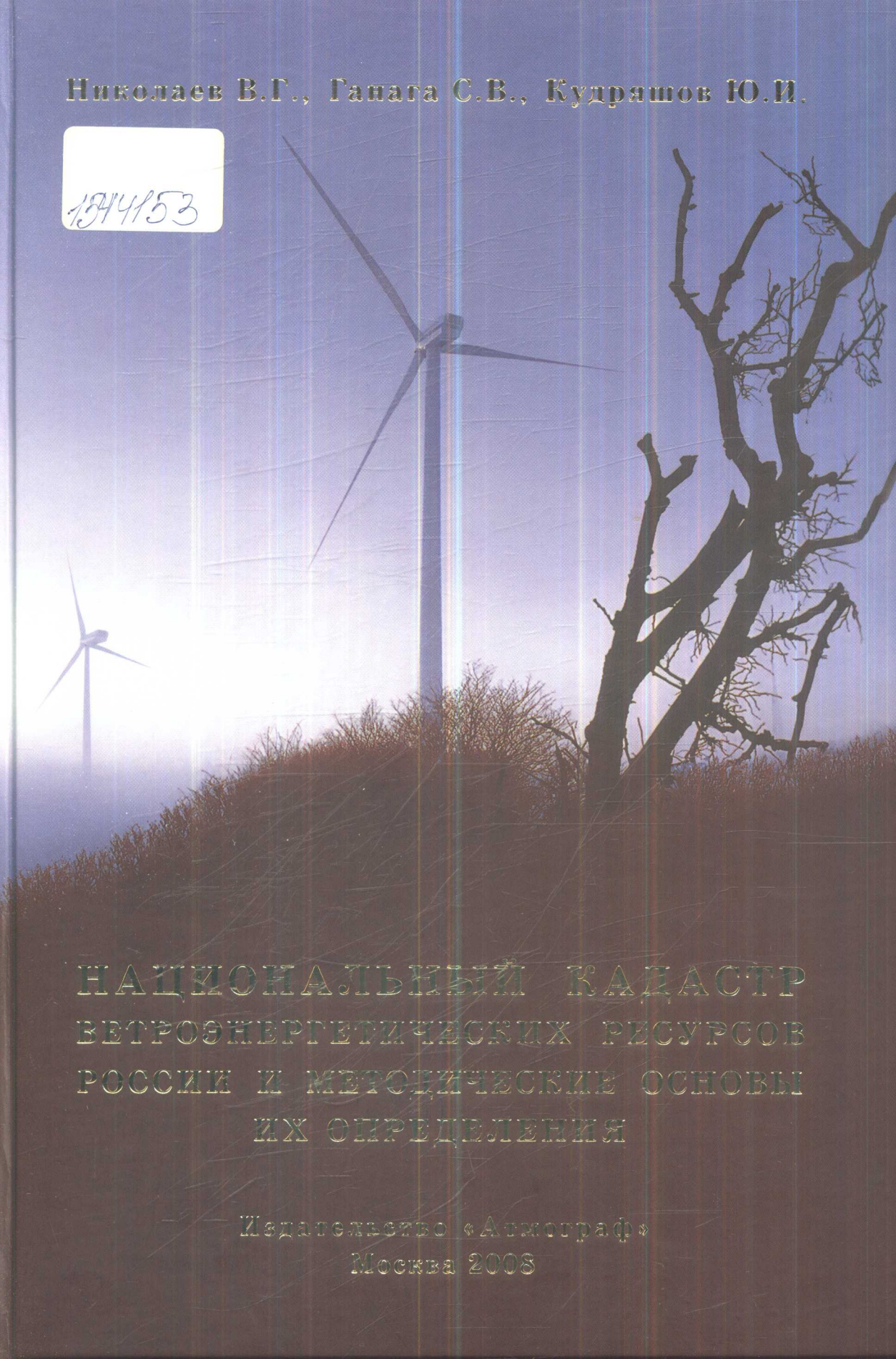


Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И.

194453



НАЦИОНАЛЬНЫЙ КАДАСТР  
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ  
РОССИИ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Издательство «Атмограф»  
Москва 2008

**Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И.**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ КАДАСТР  
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РОССИИ  
И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Издательство «Атмограф»

Москва 2008

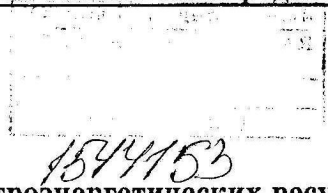
**Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России  
и методические основы их определения**

---

УДК 551.510

ББК 26.23

А 92



**Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. //Под редакцией канд. физ.-мат. наук В.Г. Николаева. М.: Изд. «АТМОГРАФ». 2008. 584 с.**

**Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методических основ их определения** разработан и подготовлен к изданию АНО НИЦ «АТМОГРАФ» при участии Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского и ОАО РАО «ЕЭС России».

Кадастр содержит систематизированный свод сведений о полученных эмпирическими и расчетными методами динамических и энергетических характеристиках ветра в приземном и пограничном слое атмосферы, его временной и пространственной структуре и изменчивости на территории России, а также об энергетической и экономической эффективности современных ВЭУ в различных ветроклиматических регионах страны.

Результаты основаны на информационном, научном и техническом заделе всех поколений ученых и инженеров, работавших в 20 веке в России и СССР, обеспечивших успехи и мировое лидерство отечественной ветроэнергетики в первой половине прошлого столетия, и получивших дальнейшее совершенствование в связи с количественным и качественным развитием государственной метеорологической сети и техники метеорологических и аэрологических измерений, автоматизированных и компьютерных средств сбора и обработки метеорологических данных.

Полученные и приведенные в Кадастре данные о ветровых характеристиках и точность их определения позволяют с известной и во многих случаях с достаточной для практики точностью оценить ветроэнергетический потенциал отдельных регионов и России в целом, а также энергетическую и экономическую эффективность и целесообразные масштабы практической утилизации ветровых ресурсов в различных регионах РФ с помощью современных ветроэнергетических устройств и технологий.

Кадастр является необходимой составляющей научно-информационного обоснования роли и важности развития отечественной ветроэнергетики и широкомасштабного использования ветроэнергетических установок и станций в энергопроизводстве России.

Предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся проектированием, определением условий функционирования и разработкой технико-экономического обоснования ветроэнергетических установок и станций на территории Российской Федерации, а также для преподавателей и обучающихся в области возобновляемой энергетики.

ISBN 978-5-904178-01-7 («НИЦ «АТМОГРАФ»)

© АНО «НИЦ «АТМОГРАФ»



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	11
<b>Часть 1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСАХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ</b> .....	<b>23</b>
1.1. Ветер как источник возобновляемой энергии .....	23
1.1.1. Основные сведения о ветре и его характеристиках .....	23
1.1.2. Представления о временной изменчивости характеристик ветра .....	31
1.1.3. Представления о пространственной изменчивости ветра ...	33
1.1.4. Физические факторы и силы, определяющие циркуляцию атмосферных слоев .....	42
1.1.5. Представления о пространственной изменчивости ветра и ее факторах в пограничном слое атмосферы .....	46
1.1.6. Измеряемые и расчетные характеристики ветра .....	57
1.1.7. Общие представления о ветроэнергетических ресурсах и потенциале .....	60
1.1.8. Аэродинамические основы использования энергии ветра ..	63
1.2. ВЭУ как преобразователь энергии ветра .....	72
1.2.1. История развития ветроэнергетических технологий .....	72
1.2.2. Современный уровень развития ветроэнергетических технологий .....	85
1.2.3. Экономические аспекты современной ветроэнергетики ....	90
1.2.4. Перспективы развития мировой энергетики .....	94
1.2.5. Основные представления о современных ВЭУ и их технических и энергетических показателях .....	102
1.2.6. Достоинства и недостатки ВЭУ .....	110
1.2.7. Возможные направления и масштабы технического применения и круг пользователей ВЭУ в России .....	111
1.2.8. Примерные потребности России в ВЭУ .....	113
1.2.9. Проблемы развития ветроэнергетики в России .....	117
1.2.10. Необходимые условия развития отечественной ветроэнергетики .....	118
1.3. Классификация задач Кадастра и принципиальные способы определения характеристик ВЭП и эффективности его использования .....	120
1.3.1. Методические подходы к определению характеристик ветра и ВЭП .....	123
1.3.2. Принципиальная схема статистического моделирования ветра	126

<b>Часть 2. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА .....</b>	<b>130</b>
2.1. Анализ и описание сети метеорологических станций и данных для определения ветроэнергетического потенциала России	132
2.1.1. Типы данных наземных метеорологических наблюдений ветра	135
2.1.2. Особенности измерений характеристик ветра на сети метеорологических станций России .....	140
2.1.3. Информационные возможности определения закономерностей временного хода скоростей ветра .....	142
2.1.4. Многолетняя изменчивость скоростей ветра .....	145
2.1.5. Пространственная изменчивость скоростей ветра по данным метеорологических наблюдений .....	152
2.1.6. Высотная изменчивость скоростей и направлений ветра по данным метеорологических наблюдений .....	153
2.2. Описание и анализ данных аэрологического зондирования	158
2.2.1. Плотность сети аэрологических станций и объем данных аэрологического зондирования в России .....	158
2.2.2. Типы, структура и формат данных аэрологических станций для определения ветроэнергетического потенциала России	160
2.2.3. Информационные возможности определения закономерностей суточного и годового хода скоростей ветра в пограничном слое атмосферы по аэрологическим данным .....	160
2.2.4. Пространственная изменчивость скоростей ветра в пограничном слое атмосферы .....	163
2.3. Особенности и информационные возможности учета свойств подстилающей поверхности при моделировании ветровых характеристик на территории России .....	165
2.4. Термодинамические характеристики атмосферы .....	170
2.5. Топографические данные и системы картографирования ..	173
<b>Часть 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА .....</b>	<b>180</b>
3.1. Практические требования к точности определения ветроэнергетических характеристик .....	180
3.2. Принципиальные подходы к определению энергетической эффективности ВЭУ .....	181
3.2.1. Основные показатели и факторы энергетической эффективности ВЭУ .....	181
3.2.2. Влияние высотного сдвига скорости ветра на мощность ВЭУ	187
3.2.3. Влияние высотного сдвига направления ветра на мощность ВЭУ .....	189
3.2.4. Ресурс современных ВЭУ .....	192
3.2.5. Техническая работоспособность, или коэффициент эксплуатации ВЭУ .....	194

3.2.6. Собственное потребление энергии системами ВЭУ .....	196
3.2.7. Оптимизация размещения ВЭУ в составе ВЭС .....	197
3.3. Методические основы определения повторяемости или функции плотности распределения ветра по скоростям $f(V)$ .....	202
3.4. Аппроксимации эмпирических распределений ветра по градациям скорости аналитическими или табулированными функциями .....	213
3.5. Определение функции распределения ветра по скоростям на высоте оси ветроколеса ВЭУ .....	219
3.6. Сравнительный анализ методов моделирования и аппроксимации высотных профилей скорости в приземном слое атмосферы .....	221
3.7. Ограничения точности статистического моделирования ветровых характеристик по метеорологическим данным .....	239
3.8. Ограничения точности статистического моделирования ветровых параметров по данным аэрологических наблюдений ..	247
3.9. Точность определения ветровых параметров на высотах 30 – 80 м .....	252
3.10. Ограничения точности определения повторяемости или функции распределения ветра по скоростям $f(V)$ .....	255
3.11. Соображения о точности определения годового и суточного хода ветроэнергетических характеристик .....	264
3.12. Возможности повышения точности определения ветроэнергетических характеристик с использованием данных ветровой разведки .....	269
3.13. Ограничения точности определения энергетических показателей ВЭУ в связи с неточностью определения характеристик ветра .....	279
3.14. Принципиальные подходы к определению экономической эффективности ВЭУ .....	283
3.14.1. Критерии и факторы экономической эффективности применения ВЭУ .....	286
3.14.2. Структура затрат при возведении и эксплуатации ВЭУ и современные экономические показатели ВЭС .....	288
3.14.3. Определение затрат на возведение, эксплуатацию и ремонт ВЭС с учетом специфики налогообложения, инфляции и кредитования в России .....	296
3.14.4. Определение себестоимости электроэнергии ВЭУ в разных регионах территории России .....	303
3.14.5. Оценка сроков окупаемости ВЭУ в разных регионах территории России .....	309
3.14.5.1. Оценка окупаемости ВЭС на основе прогноза тарифов и цен на покупку вырабатываемой ими электроэнергии .....	310

# Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения

---

3.14.5.2. Оценка окупаемости ВЭС за счет экономии замещенного при их использовании органического топлива .....	314
3.15. Основные выводы методического анализа .....	319
<b>Часть 4. МЕТОДОЛОГИЯ КАДАСТРА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ....</b>	<b>326</b>
4.1. Выбор и обоснование методики определения динамических характеристик ветра и его ветроэнергетического потенциала .....	327
4.2. Информационная основа методики Кадастра .....	333
4.2.1. Данные метеорологических измерений ветровых характеристик .....	334
4.2.2. Данные аэрологического зондирования ветра в пограничном слое атмосферы .....	341
4.2.3. Данные о термодинамических характеристиках атмосферы ..	343
4.2.4. Топографические данные и системы картографирования ..	344
4.3. Основные составляющие методики Кадастра и их погрешности .....	345
4.3.1. Метод определения повторяемостей и функций распределения ветра по скоростям $f(V)$ .....	345
4.3.2. Аппроксимации эмпирических распределений ветра по градиентам скорости табулированными функциями Гринцевича ..	352
4.3.3. Моделирование характеристик ветра на высоте флюгерных измерений по метеорологическим данным .....	353
4.3.4. Моделирование характеристик ветра на высоте 100 м и промежуточных высотах (30 – 80 м) по аэрологическим данным ..	356
4.3.5. Метод моделирования высотных профилей скорости в приземном 100-метровом слое атмосферы .....	357
4.3.6. Моделирование ветровых условий в прибрежных морских районах .....	360
4.3.7. Определение удельных импульсов и мощностей ветра в заданных местах территории или районах России .....	361
4.3.8. Определение энергетической эффективности ВЭУ с известными техническими характеристиками .....	363
4.3.9. Определение ветрового потенциала (ресурса) регионов России ..	373
4.3.10. Суммарная погрешность определения характеристик ветра, ветроэнергетического потенциала и энергетической эффективности ВЭУ .....	375
4.4. Оценка экономической эффективности использования ВЭС в России .....	377
4.4.1. Основные положения методики оценки экономической эффективности ВЭС .....	377
4.4.2. Определение себестоимости электроэнергии ВЭУ в разных регионах территории России .....	385
4.4.3. Оценки сроков окупаемости ВЭУ в разных регионах России ..	386

<b>Часть 5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ТЕРРИТОРИИ РФ ...</b>	<b>395</b>
5.1. Распределение средней скорости ветра на территории России	395
5.1.1. Средняя скорость на высоте флюгерных измерений .....	396
5.1.2. Средняя скорость на высоте 100 м .....	400
5.1.3. Средняя скорость на высоте 50 м над поверхностью .....	402
5.1.4. Суточная изменчивость скорости ветра .....	403
5.2. Распределение удельного импульса ветра на территории России .....	408
5.2.1. Средний удельный импульс на высоте флюгерных измерений	409
5.2.2. Средний удельный импульс на высоте 100 м .....	410
5.2.3. Средний удельный импульс на высоте 50 м .....	411
5.3. Распределение удельной мощности ветра на территории России .....	414
5.3.1. Средняя удельная мощность ветра на высоте флюгерных измерений .....	415
5.3.2. Средняя удельная мощность ветра на высоте 100 м .....	417
5.3.3. Средняя удельная мощность ветра на высоте 50 м .....	419
5.4. Распределение показателей энергетической эффективности ВЭУ на территории России .....	424
5.4.1. Распределение коэффициентов использования номинальной мощности ВЭУ на высоте 100 м .....	425
5.4.2. Распределение коэффициентов использования номинальной мощности ВЭУ на высоте 50 м .....	427
5.5. Распределение вероятности энергетических штилей на территории РФ .....	433
5.6. Оценка технического и экономического ветроэнергетических потенциалов по федеральным округам и субъектам РФ .....	437
5.7. Распределение показателей экономической эффективности ВЭУ на территории России .....	442
5.7.1. Себестоимость электроэнергии современных ВЭС в России	443
5.7.2. Оценки сроков окупаемости ВЭС в разных регионах России	455
5.8. Современные технологические и экономические предпосылки и возможности создания ветроэнергетической отрасли в электроэнергетике России .....	461

<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. Карты распределения по территории РФ средних сезонных и годовых значений и точности определения характеристик ветра (скоростей, скоростного напора, удельной мощности, мощности ВЭУ (в терминах коэффициентов использования ее номинальной мощности)) .....</b>	<b>471</b>
--	------------