

Укрепление трансграничного сотрудничества
в области использования ветровой и солнечной энергии
в энергосистемах стран СНГ
для реализации цели №7 устойчивого развития ООН

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

ПО
ЕДИНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ ВАЛОВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ
ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СТРАНАХ СНГ,
РЕКОМЕНДУЕМЫМ ФОРМАТАМ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ,
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИМ ОСНОВАМ И ПРИНЦИПАМ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ПРОГРАММ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛОВ ВЕТРОВОЙ
И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Содержание

Обозначения и сокращения	4
Термины и определения.....	4
Введение.....	5
1. Методологии оценки потенциалов солнечной и ветровой энергии в странах СНГ: разработка атласов, проблемы и предложения.....	7
1.1. Веб-Атлас энергетического потенциала возобновляемых источников энергии Республики Казахстан.....	7
1.2. Атлас ветров Республики Узбекистан.....	8
1.3. Атласы ресурсов возобновляемой энергии на территории России.....	9
1.4. Кадастр возобновляемых источников энергии Республики Беларусь.....	10
1.5. Результаты сравнительного анализа опыта оценки энергетического потенциала солнечной и ветровой энергии государствами-участниками СНГ	11
2. Общие положения предлагаемой методологии.....	12
2.1. Основные принципы методологии оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов ВИЭ	12
2.2. Основные этапы оценки природных ресурсов и потенциалов ВИЭ	13
3. Оценка природных ресурсов, валового и технического потенциалов солнечной энергии.....	13
3.1. Рекомендуемые источники данных для оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов солнечной энергии.....	13
3.2. Оценка природных ресурсов и валового потенциала солнечной энергии.....	16
3.3. Рекомендуемый формат предоставления данных о природных ресурсах и валовом потенциале солнечной энергии	17
3.4. Оценка технического потенциала солнечной энергии	18
3.5. Рекомендуемый формат предоставления данных о техническом потенциале солнечной энергии.....	18
4. Оценка природных ресурсов, валового и технического потенциала энергии ветра .	19
4.1. Рекомендуемые источники данных для оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов энергии ветра.....	19
4.1.1. База данных NASA POWER.....	19
4.1.2. Глобальный Атлас Ветра (GWA 2.0).....	21
4.2. Оценка природных ресурсов энергии ветра	23

4.3. Рекомендуемый формат предоставления данных о природных ресурсах энергии ветра	24
4.4. Оценка валового потенциала энергии ветра	24
4.5. Рекомендуемый формат предоставления данных о валовом потенциале энергии ветра	25
4.6. Оценка технического потенциала энергии ветра	26
4.7 Рекомендуемый формат предоставления данных о техническом потенциале энергии ветра	26
5. Оценка топливного и экологического потенциалов (эффектов) ВИЭ	27
5.1. Оценка топливного потенциала (эффекта) ВИЭ	27
5.2. Оценка экологического потенциала ВИЭ	28
5.2.1. Оценка предотвращённых выбросов парниковых газов	28
5.2.2. Оценка предотвращённых выбросов загрязняющих веществ	28
6. Методологические основы и принципы развития региональных программ реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии	33
6.1. Принципы разработки и реализации региональных программ	33
6.2. Структура программы	33
6.3. Основные этапы разработки и реализации программы	33
Заключение	34

Обозначения и сокращения

АТЕ – административно-территориальная единица;
АС – аэрологическая станция;
БД – база данных;
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
ЕЭС – единая энергетическая система;
ЗВ – загрязняющие вещества;
ИЭС – изолированная энергосистема;
КПД – коэффициент полезного действия;
МС – метеорологическая станция;
ООН – Организация Объединенных Наций;
ОЭС – объединенная энергетическая система;
ПГ – парниковые газы;
СНГ – Содружество Независимых Государств;
ТЭО – технико-экономическое обоснование;
ТЭС – тепловая электрическая станция;
ЦУР – Цель устойчивого развития;
ЭЭС СНГ – Электроэнергетический Совет СНГ;
IRENA – Международное Агентство по Возобновляемой Энергетике.

Термины и определения

• *Возобновляемые источники энергии* – источники энергии, непрерывно возобновляемые за счет естественно протекающих природных процессов: энергия солнечного излучения, энергия ветра, гидродинамическая энергия воды; геотермальная энергия: тепло грунта, грунтовых вод, рек, водоемов, а также антропогенные источники первичных энергоресурсов: биомасса, биогаз и иное топливо из органических отходов, используемые для производства электрической и (или) тепловой энергии, а также иные источники энергии, определяемые в качестве возобновляемых, предусмотренные в рамках законодательства государств-участников СНГ.

• *Использование ВИЭ* – процесс, включающий заготовку (добычу), транспортировку, хранение, подготовку к использованию, переработку или иную трансформацию ВИЭ, а также производство из них электрической, тепловой и других видов энергии.

• *Природные ресурсы ВИЭ*: – средняя дневная сумма солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности, кВт·ч/м²·день; – средняя мощность воздушной струи единичной площади сечения, Вт/м².

• *Валовый потенциал ВИЭ* оцениваемой территории – среднегодовой объем энергии, который может быть полностью преобразован в полезно используемую энергию без учета географических, законодательных, экономических, экологических, социальных и других ограничений на возможность размещения энергетических установок на этой территории.

• *Технический потенциал ВИЭ* оцениваемой территории – часть валового потенциала, которая может быть реализована на землях, пригодных для размещения энергетического оборудования, современными энергетическими установками.

• *Топливный потенциал (эффект) применения ВИЭ* – объем неиспользованного органического топлива, в условном и натуральном выражении, при производстве на ТЭС равного с ВИЭ количества электроэнергии.

• *Экологический потенциал (эффект) применения ВИЭ* – величина предотвращенных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу, образующихся в топливосжигающих установках при сжигании органического топлива.

Введение

1 января 2016 года официально вступили в силу 17 целей в области устойчивого развития (ЦУР), изложенные в Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, которая была принята главами 193 государств, включая руководителей стран Содружества Независимых Государств (СНГ) в сентябре 2015 года на историческом саммите Организации Объединенных Наций (ООН)¹. Цели в области устойчивого развития и связанные с ними задачи являются глобальными по своему характеру и универсально применимыми и при этом обеспечивают учет различных национальных условий в уровнях потенциала развития и уважение национальных стратегий и приоритетов. Поскольку они взаимосвязаны, усилия по их достижению должны носить комплексный характер.

ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех»² основана на том, что энергия имеет центральное значение почти для каждой из основных проблем и возможностей, с которыми сегодня сталкивается мир. Будь то рабочие места, безопасность, изменение климата, производство продуктов питания или увеличение доходов – доступ к источникам энергии для всех является определяющим фактором. Устойчивая энергетика необходима для укрепления экономики, защиты экосистем и достижения справедливости.

Международное сотрудничество является одним из инструментов расширения использования ВИЭ, в связи с чем одним из важнейших индикаторов ЦУР 7 является следующий: *«к 2030 году укрепить международное сотрудничество в целях облегчения доступа к исследованиям и технологиям в области чистой энергии, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), энергоэффективность и передовые экологически чистые технологии использования ископаемых видов топлива, а также содействия инвестициям в энергетическую инфраструктуру и технологии экологически чистой энергетики»*³.

В 1981 году на Конференции ООН по новым и возобновляемым источникам энергии в Найроби, Кения, было принято Решение о создании международного агентства по использованию возобновляемых источников энергии (IRENA), которое было официально основано в Бонне, Германия, 26 января 2009 года⁴. Сегодня при активном участии более 170 государств-членов, в число которых входят все государства-участники СНГ, IRENA содействует использованию возобновляемых ресурсов и технологий в качестве основы перехода к устойчивому будущему и помогает странам использовать свой потенциал в области ВИЭ.

20 ноября 2013 года Решением Совета глав правительств СНГ были утверждены Концепция сотрудничества государств-участников СНГ в области использования ВИЭ и План первоочередных мероприятий по ее реализации⁵. Концепция представляет совокупность согласованных взглядов и подходов государств-участников СНГ к сотрудничеству в сфере использования ВИЭ и определяет цели, задачи, принципы, механизмы и основные направления такого сотрудничества. Среди целей и основных задач сотрудничества государств-участников СНГ в сфере использования ВИЭ изучение и распространение международного опыта и опыта государств-участников СНГ, обеспечение доступности и унификации статистических данных в области ВИЭ рассматриваются как необходимый первый шаг создания благоприятной рыночной среды для развития возобновляемой энергетики.

¹ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/>

² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/>

³ https://www.unece.org/fileadmin/DAM/vision2030/BackgroundDocument_Rus.pdf

⁴ <http://renewnews.ru/irena/>

⁵ <http://e-cis.info/page.php?id=23882>

В 2015 году в рамках данной Концепции и Плана первоочередных мероприятий по ее реализации Электроэнергетический Совет СНГ приступил к формированию «Дорожной карты» развития возобновляемой энергетики в государствах-участниках СНГ⁶.

Одним из принципиальных результатов первого этапа разработки «Дорожной карты» стало осознание необходимости создания общих подходов к укреплению трансграничного сотрудничества в области интеграции объектов возобновляемой энергетики в энергосистемы стран СНГ, совместной реализации проектов, привлечения инвестиций, трансфера инновационных технологий.

Это обстоятельство получило отражение в рекомендации «продолжить работу по формированию единой методологии оценки энергетических потенциалов ВИЭ, соответствующей мировому подходу, используемому Международным агентством по возобновляемым источникам энергии IRENA при разработке Глобального и региональных атласов ВИЭ».

С учетом наибольших масштабов развития ветровой и солнечной энергетики данная работа охватывает эти сектора возобновляемой энергетики и посвящена:

- подготовке детальных предложений по единой методологии оценки природных ресурсов, валовых и технических потенциалов ветровой и солнечной энергии;
- учету топливного и экологического эффектов этих потенциалов в странах СНГ;
- разработке рекомендаций по единому формату представления данных;
- анализу положительного опыта оценки потенциалов солнечной и ветровой энергии в странах СНГ;
- анализу и формулированию предложений по методологическим основам и принципам развития региональных программ реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии.

Предлагаемые рекомендации предназначены для согласования и совершенствования общих подходов формирования информационной базы энергетического потенциала этих видов ВИЭ и принятия технических и инвестиционных решений о выборе и использовании оборудования на основе ВИЭ в централизованных и распределенных системах энергообеспечения с учетом экономических, технических, экологических, логистических и других ограничений и факторов.

⁶ http://energo-cis.ru/wyswyg/file/rgos/RGOS_20170516-18/Приложение_4.pdf

1. Методологии оценки потенциалов солнечной и ветровой энергии в странах СНГ: разработка атласов, проблемы и предложения

1.1. Веб-Атлас энергетического потенциала возобновляемых источников энергии Республики Казахстан

В 2017 г. австралийской компанией в сотрудничестве с исследовательскими центрами Республики Казахстан разработана Интерактивная система Веб-Атлас энергетического потенциала возобновляемых источников энергии Республики Казахстан⁷. В веб-атласе ветровой энергии приводятся карты распределения средних скоростей ветра и ветроэнергетического потенциала по сезонам года на высотах 10, 50 и 100 м над поверхностью земли по территории Республики Казахстан. В качестве исходной информации используются результаты измерений, проведенных на 13 мачтах ветромониторинга, установленных на территории Казахстана и представленных на Рис.1.

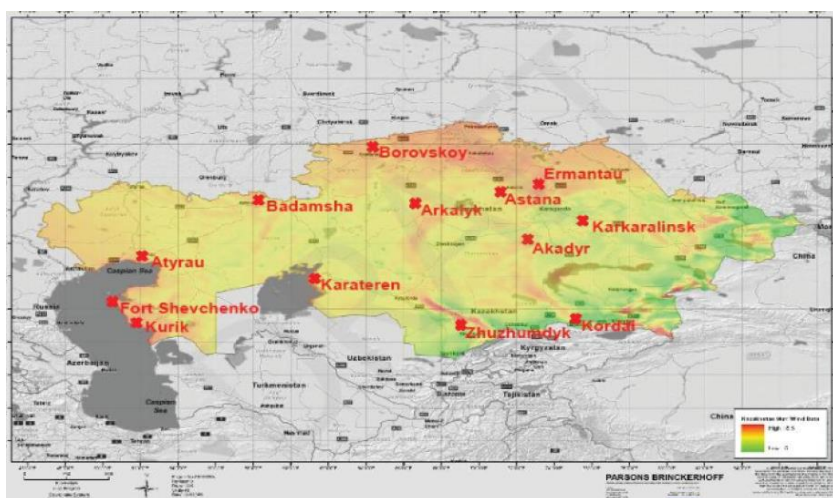


Рис.1. Карта расположения ветроизмерительных комплексов на территории республики Казахстан

Построение карт ветроэнергетического потенциала производилось с учётом фиксированного значения эффективности работы ветроэлектродвигателя, равного $k = 0,35$. В Атласе предусмотрена возможность самостоятельного расчёта потребителем ветроэнергетического потенциала при других значениях коэффициента эффективности на основе карт среднесезонных и среднегодовых полей скоростей ветра и плотности воздуха для высот 10, 50 и 100 м⁸.

Оценка технического потенциала солнечной энергии по территории Республики Казахстан основана на усредненных технических характеристиках фотоэлектрических модулей⁹. Для построения карт поступающей суммарной солнечной энергии на горизонтальную поверхность использованы результаты спутниковых наблюдений NASA за 22-летний период (июль 1983 – июнь 2005г.) с учетом числа пасмурных дней. Исходные данные представлены таблицей значений инсоляции, привязанных к точкам в узлах координатной сетки с шагом в 1° по широте и долготе.

На Рис.2 показана схема расположения метеостанций, данные которых участвовали в построении карты количества пасмурных дней. Привязанные к метеопостам Республики Казахстан результаты расчетов были визуализированы на картах путем интерполяции.

⁷ <http://energy-atlas.kz>

⁸ <http://energy-atlas.kz/Content/documents/Ветровая%20энергия.pdf>

⁹ <http://energy-atlas.kz/Content/documents/Солнечная%20энергия.pdf>

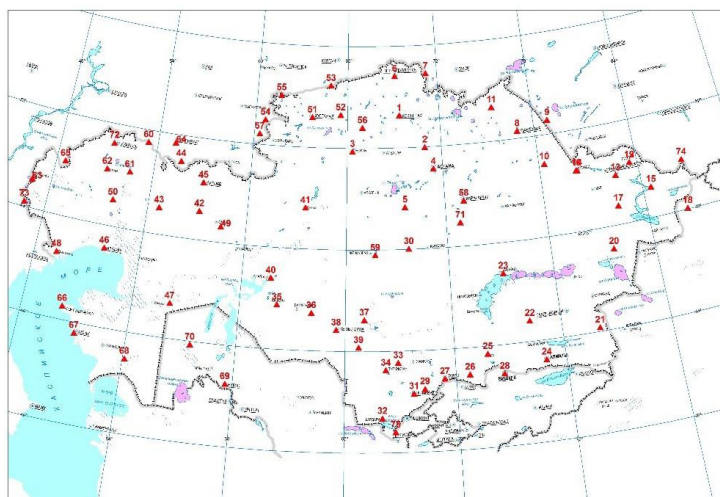


Рис.2. Карта метеостанций Казахстана, использованных для оценки количества пасмурных дней

Особо следует отметить, что Атлас энергетического потенциала ВИЭ Республики Казахстан размещён в интернете и находится в открытом доступе.

1.2. Атлас ветров Республики Узбекистан

В 2015 г немецкими компаниями Geo-Net и Intec-Gora был разработан «Атлас ветров» в виде интерактивной информационно-аналитической системы ветроэнергетического потенциала Узбекистана¹⁰. На основании разработанного Атласа компанией «Узбекэнерго» были определены два перспективных участка – в Навоийской области и на юге Каракалпакстана. В марте 2015 г. на каждом из участков были установлены метеорологические мачты высотой 85 метров. Атлас разработан методом компьютерного моделирования. Информация по источникам исходных данных о распределении скоростей ветра отсутствует. Оценка среднегодовых скоростей ветра проводилась на высоте 80 м (Рис.3).

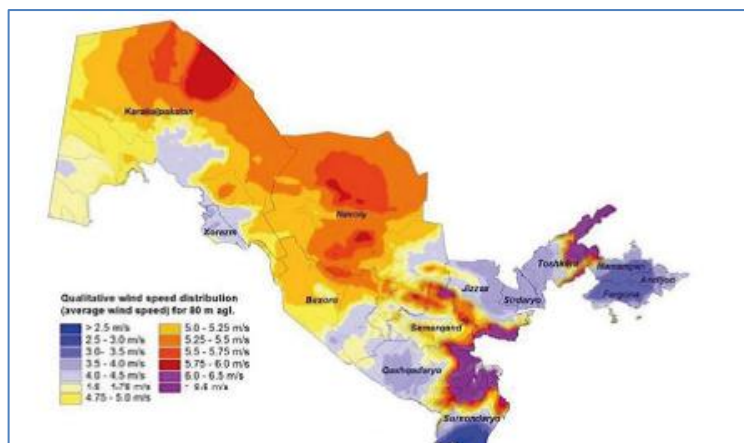


Рис.3. Карта среднегодовых скоростей ветра Республики Узбекистан

В открытых источниках информации доступ к Атласу отсутствует.

¹⁰ <http://pubdocs.worldbank.org/en/615901492520591351/Uzbekistan-Wind-Power-ru.pdf>

1.3. Атласы ресурсов возобновляемой энергии на территории России

В 2007 г. выпущен первый Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива под редакцией д.т.н. П.П. Безруких¹¹. В справочнике с дифференциацией по субъектам федерации и федеральным округам оцениваются три вида энергетических потенциалов ВИЭ:

- валовый (теоретический) ресурс (потенциал);
- технический ресурс (потенциал);
- экономический потенциал.

Приводится методология оценки валового и технического потенциала, основанная на существующих принципах использования энергии ветра и солнца. При оценке технического потенциала принимается условно постоянная мощность ветроустановки и заниженная по современным данным эффективность солнечных батарей. Величина экономического потенциала определяется как доля технического на основании экспертных оценок.

Терминологические определения потенциалов, приведенные в справочнике, широко используются в профессиональной среде.

В период 2008-2011 гг. д.т.н. В.Г. Николаевым был выпущен ряд монографий, в том числе: Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения¹²; Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России¹³; Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития ветроэнергетики в России¹⁴. В качестве исходной информации для оценки потенциалов энергии ветра использованы многолетние данные наблюдений на метеорологических и аэрологических станциях СССР и России. Наиболее репрезентативными и надежными считаются данные, полученные за период 1950-1980 гг. В основу методического подхода положена авторская Модель «СЭНДВИЧ», которая включает в себя эмпирическую модель, сплайн-аппроксимацию и полуэмпирическую модель, описывающие высотный профиль изменения скорости ветра и учитывающие рельеф местности и шероховатости подстилающей поверхности при моделировании скоростей в заданном месте.

Монографии содержат расчетные данные характеристик и потенциала ветровой энергии, многочисленные графики и карты для территории России, СНГ и стран Балтии.

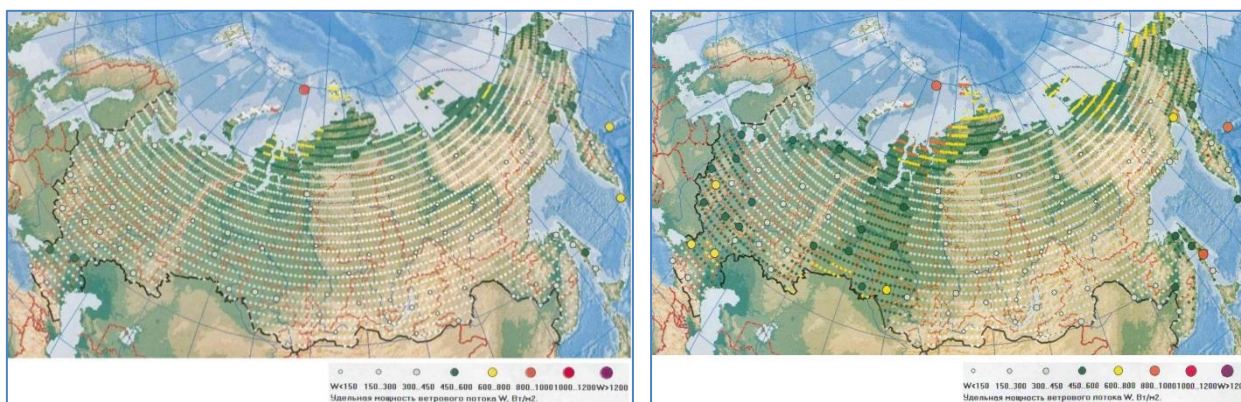


Рис.4. Карта распределения среднегодовой удельной мощности ветрового потока на высотах 50 и 100 м в узлах координатной сетки

¹¹ <https://www.c-o-k.ru/library/document/13071>

¹² <https://search.rsl.ru/ru/record/01004256320>

¹³ <https://search.rsl.ru/ru/record/01005470302>

¹⁴ http://catalog.v1.cntb-sa.ru/catalog_post/resursnoe-i-tehniko-ekonomicheskoe-obosnovanie-shirokomasshtabnogo-razvitiya-vetroenergetiki-v-rossii-v-g-nikolaev/

В 2015г. специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова, Института энергетики НИУ ВШЭ, Объединенного института высоких температур РАН разработан Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России¹⁵. В Атласе-Справочнике приведены методики оценки и результаты расчетов природных ресурсов и энергетических потенциалов энергии солнца и ветра на всей территории Российской Федерации с шагом 1° по широте и долготе.

В качестве источника исходной информации выступала база данных NASA SSE (июль 1983 – июнь 2005г.): для расчета природных ресурсов и потенциалов энергии ветра использовались среднемесячные повторяемости скоростей ветра по градациям на высоте 50 м над поверхностью земли, для солнечной энергии – среднемесячные дневные суммы суммарной солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности.

Оценка ресурсов энергии ветра проводилась на высотах 30, 50, 100 и 120 м, ресурсов солнечной энергии – на горизонтально ориентированную поверхность. При расчете технического потенциала энергии ветра учитывались кривые мощности реальных ветроустановок, солнечной энергии – средний КПД фотоэлектрических модулей (14%).

Примеры карт распределения технического потенциала ветровой и солнечной энергии приведены на Рис.5.

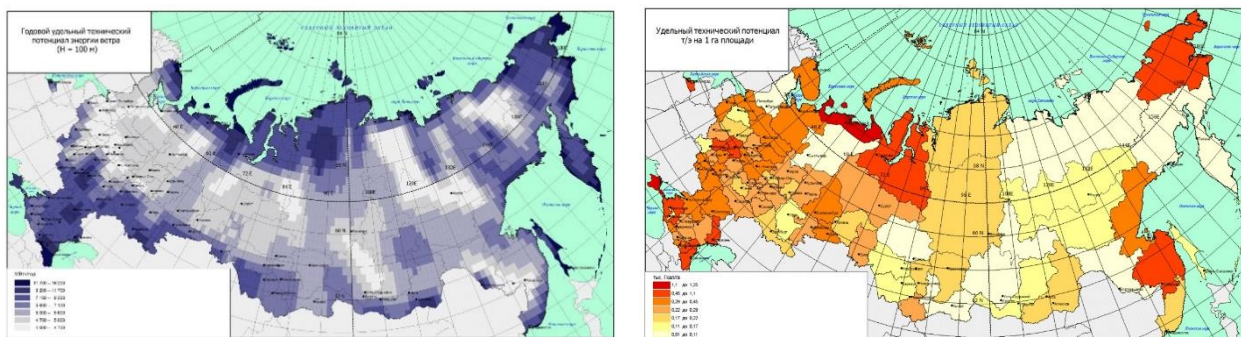


Рис.5. Карты распределения технического потенциала ветровой и солнечной энергии на территории России

Атлас выпущен в виде полиграфического издания, интернет-версия отсутствует.

1.4. Кадастр возобновляемых источников энергии Республики Беларусь

В 2012 г. в Республике Беларусь сформирован государственный кадастр возобновляемых источников энергии, в котором собрана полная информация как об уже действующих установках, так и о площадках возможного размещения новых объектов, имеются сведения о производителях энергии из возобновляемых источников энергии и др.¹⁶ Исследование ветроэнергетического потенциала Беларуси выполнялось Гидрометом Беларуси совместно с РУП «Белэнергосетьпроект» и НППП «Ветромаш». Результаты исследований способствовали формированию руководящих документов по применению, созданию, строительству и эксплуатации ветротехники.

Согласно данным Государственного кадастра возобновляемых источников энергии Республики Беларусь, в настоящее время 640 действующих установок суммарной мощностью 1161 МВт относятся к возобновляемым источникам энергии. Из них к энергии ветра относится 26 площадок с 56 ветроустановками в Брестской, Витебской, Гродненской, Минской и Могилевской областях суммарной мощностью 43,3 МВт. В Таблице 1 приведена информация из указанного Кадастра по одной из ветроустановок. Обращает на себя внимание, что по данной установке представлена информация, в том числе по экономии топлива

¹⁵ <https://istina.msu.ru/publications/book/11596712/>

¹⁶ <https://www.belta.by/economics/view/kadastr-vozobnovljajemyh-istochnikov-energii-sformirovan-v-belarusi-71336-2012>

(т у.т./год), а также по предотвращённым выбросам парниковых газов (т/год) и загрязняющим веществам (т/год).

Таблица 1 – Ветроэнергетическая установка NEG Micon NM 48-750 в районе д. Августово

Название организации: ООО «Виндэнергопром»	Вид используемой энергии: Энергия ветра
Вырабатываемый вид энергии: Электрическая	Электрическая мощность: 0,75 МВт
Годовая выработка электроэнергии, МВт·ч/год: 2316,60	Годовой отпуск электроэнергии, МВт·ч/год: 2316,60
Годовая выработка тепла, Гкал/год:	Годовой отпуск тепла, Гкал/год:
Количество часов работы в год: 3120	Экономия условного топлива, т у.т./год: 284,56
Снижение выбросов парниковых га- зов, т/год: 2340,00	Снижение/увеличение выбросов основных загряз- няющих веществ, т/год: -8,17

1.5. Результаты сравнительного анализа опыта оценки энергетического потен- циала солнечной и ветровой энергии государствами-участниками СНГ

Сравнительный анализ основных положений методологий оценки потенциалов ВИЭ и практической их реализации в странах СНГ показал следующее:

1. При разработке Атласов Казахстана и Узбекистана основными исполнителями были зарубежные компании, финансируемые международными финансовыми институ-
тами. Национальные исследовательские центры проходили обучение на этих проектах. При
разработке Атласа России отечественными коллективами были разработаны собственные
детальные методики, в полной мере учитывающие мировой опыт.

2. При разработке всех рассматриваемых солнечных атласов в качестве исходной
информации о плотности энергии излучения использовались данные БД NASA SSE с сет-
кой $1^0 \times 1^0$.

3. При разработке Атласа ветров Казахстана в качестве исходной информации ис-
пользовались данные измерений на 13 ветроизмерительных комплексах, оценки произво-
дились на основе среднесезонных или среднегодовых скоростей на 3 высотах при фиксиро-
ванном значении коэффициента использования установленной мощности, т.е. в расчетах не
рассматривались кривые мощности реальных ветрогенераторов и не учитывалась повторя-
емость скорости ветра, что принципиально снижает точность расчетов. Существенным до-
стоинством Атласа является его доступность в интернете и интерактивность.

4. При разработке Атласа ветров Узбекистана в качестве исходной информации ис-
пользовались данные спутниковых наблюдений без указания источника, оценивались
только среднегодовые скорости ветра на высоте 80 м, расчет технического потенциала не
проводился. Декларируемая Интерактивность из-за отсутствия доступа к Атласу в интер-
нете не может быть подтверждена.

5. При разработке Атласа ветров России в качестве исходной информации исполь-
зовались данные БД NASA SSE с сеткой $1^0 \times 1^0$ о повторяемости скоростей ветра на высоте
50 м. Оценки потенциалов проводились на четырех высотах с учетом кривых мощности
реальных ветрогенераторов. В полиграфическом издании Атласа приведено множество
карт, которые наглядно отражают распределение ветроэнергетических ресурсов по терри-
тории всей страны. Отсутствие доступа к атласу и расчетным базам данных через интернет
не позволяет осуществлять режим интерактивной работы с Атласом.

Представляется целесообразным учесть все преимущества предлагаемых подходов и
устранить имеющиеся недостатки для получения единой общей методологии оценки потен-
циалов ветровой и солнечной энергии в государствах-участниках СНГ.

2. Общие положения предлагаемой методологии

2.1. Основные принципы методологии оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов ВИЭ

1. Использование опыта стран СНГ по оценке потенциалов и разработке атласов ВИЭ;
2. Использование опыта IRENA по разработке Глобального атласа ВИЭ;
3. Использование БД NASA и БД GWA в качестве исходной информации о природных ресурсах ВИЭ;
4. Использование репрезентативных данных многолетних измерений, проводимых на метеорологических, аэрологических и актинометрических станциях;
5. Использование официальных статистических данных о работе энергосистем государств-участников СНГ, включая данные об удельных расходах топлива на выработку электроэнергии на ТЭС, выбросах парниковых газов и загрязняющих веществ на ТЭС, потерях в электрических сетях и пр.;
6. Оценка природных ресурсов и валового потенциала ВИЭ;
7. Оценка технического потенциала ВИЭ с учётом доступных территорий для размещения генерирующего оборудования и его технических характеристик;
8. Оценка природных ресурсов и потенциалов ВИЭ на различных уровнях административно-территориального деления: национальном, региональном, муниципальном;
9. Оценка природных ресурсов и потенциалов ВИЭ на различных уровнях интеграции электроэнергетических систем: ЕЭС, ОЭС, ИЭС, децентрализованная зона;
10. Учет топливных и экологических эффектов, возникающих при реализации технического потенциала ВИЭ.

2.2. Основные этапы оценки природных ресурсов и потенциалов ВИЭ

Основные этапы предлагаемой методологии оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов ВИЭ приведены на следующей блок-схеме (Рис.6).



Рис.6. Блок-схема оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов солнечной и ветровой энергии

3. Оценка природных ресурсов, валового и технического потенциалов солнечной энергии

3.1. Рекомендуемые источники данных для оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов солнечной энергии

Предложенная методология рекомендует использовать несколько источников исходной информации о распределении ресурсов солнечной энергии.

Бесплатная база данных NASA POWER как источник первичной информации о распределении ресурсов солнечной энергии ¹⁷на содержит, в том числе расчетные значения *природных ресурсов солнечной энергии – среднегодовой дневной суммы суммарной солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности (кВт·ч/м²·день)*, полученной по результатам многолетних наблюдений за солнечной радиацией для сетки 0,5°×0,5°, покрывающей весь земной шар. Такое высокое пространственное разрешение существенно

¹⁷ NASA Surface meteorology and Solar Energy // Atmospheric science data center. [Электронный ресурс]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>

превышает пространственное разрешение существующих наземных метеорологических, аэрологических и актинометрических сетей. БД учитывает особенности различных климатических зон земного шара, в том числе характер отражения от земной поверхности (альбедо), состояние облачности, загрязнение атмосферы аэрозолями.

БД доступна через Интернет¹⁸. На Рис.7 в качестве примера представлена карта с окном «POWER Single Point Data Access».

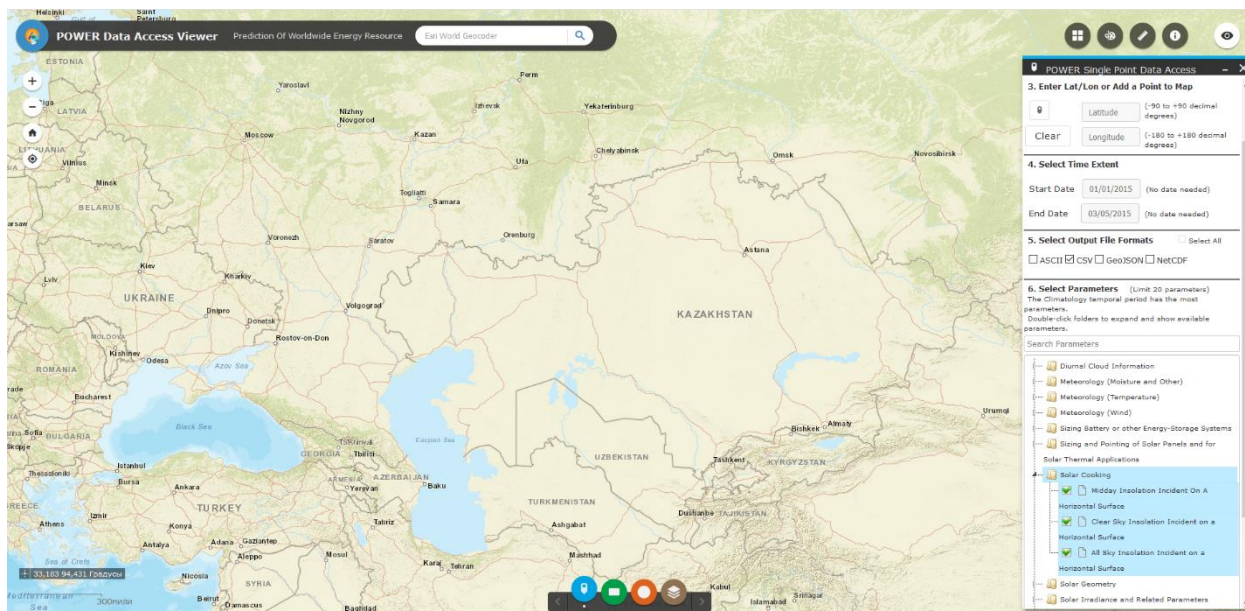


Рис.7. Карта NASA «POWER Data Access Viewer» – Прогнозирование мирового энергетического ресурса

Информация о природных ресурсах солнечной энергии находится в папке «Solar Cooking» и для выделенной координаты выдается в виде таблицы, пример которой приведен на Рис.8.

POWER_SinglePoint_Climatology_041d33N_069d31E_26dee78a [Только для чтения] - Excel															
Файл Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Справка Помощь Общий доступ															
H20															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	-BEGIN HEADER-														
2	NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatologies														
3	22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Cli														
4	Location: Latitude 41.3266 Longitude 69.3051														
5	Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 556.42 meters Site = na														
6	Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)														
7	Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999														
8	Parameter(s):														
9	ALLSKY_SFC_SW_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface (kW-hr/m^2/day)														
10	-END HEADER-														
11	LAT,LON,PARAMETER,JAN,FEB,MAR,APR,MAY,JUN,JUL,AUG,SEP,OCT,NOV,DEC,ANN														
12	41.32661,69.30511,ALLSKY_SFC_SW_DWN,	1.87,	2.70,	3.93,	5.37,	6.65,	7.54,	7.32,	6.61,	5.29,	3.68,	2.32,	1.63,	4.58	
13															
14															
15															

¹⁸ <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Рис.8. Таблица данных среднемесячных дневных сумм суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, для выделенной координаты (на примере г. Ташкента).

Глобальный солнечный атлас («Атлас»)¹⁹ имеет свободный доступ и поддерживает развитие солнечной энергетики на этапах разведки, разведки, выбора площадки и предварительной оценки. Фотоэлектрические (PV) технологии обычно требуют анализа глобального горизонтального облучения (GHI) и Глобальное наклонное облучение (GTI, т.е. солнечное излучение, получаемое поверхностью фотоэлектрических модулей).

Атлас предоставляет долгосрочные средние значения солнечного ресурса (глобальный, рассеянный и прямой нормальный), основные климатические явления, которые определяют выработку солнечной энергии. Этот Атлас поддерживает только первую стадию жизненного цикла проекта солнечной энергии: поиск и предварительная оценка.

Атлас охватывает области между 60 ° северной широты и 45 ° южной широты. Области к северу и югу от этих координат не охвачены, поскольку наклон спутниковых снимков не позволяет точно оценить облачность. Разрешение первичной сетки данных о солнечном ресурсе составляет приблизительно от 3 до 7 км (в зависимости от широты), которое повышается за счет уменьшения до номинального разрешения приблизительно 1 км. Пространственное разрешение других параметров данных также было согласовано до 1 км.

Солнечный ресурс и потенциал фотоэлектрической мощности представляют период времени с января 1994/1999/2007 по декабрь 2015 года, в зависимости от охвата спутниковыми данными. Временное разрешение (шаг по времени) солнечного ресурса зависит от области спутника, и это колеблется между 10/15/30 минутами.

В этом Атласе представлены долгосрочные среднегодовые значения солнечного ресурса и потенциала фотоэлектрической энергии, альтернативно описанные в виде годовых и ежедневных сводок. Температура воздуха представляется в виде долгосрочного среднегодового значения.

GTI (Глобальное наклонное облучение): сумма прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность стационарных фотоэлектрических модулей [кВтч / м²]. По сравнению с горизонтальной поверхностью наклонная поверхность также получает небольшое количество отраженного от земли солнечного излучения.

PVOUT (PV выработка электроэнергии): количество энергии, преобразованное фотоэлектрической системой в электроэнергию [кВт · ч / кВт_{э.мощн.}], которое, как ожидается, будет выработано в соответствии с географическими условиями площадки и конфигурацией фотоэлектрической системы. Рассматриваются три конфигурации фотоэлектрической системы: (i) Небольшие жилые помещения; (ii) реклама среднего размера; и (iii) наземные крупномасштабные.

ОПТА (оптимальный угол): оптимальный угол наклона [°] наклонных и неподвижных фотоэлектрических модулей для конкретного азимута (ориентации), для которого фотоэлектрические модули получают наибольшее количество солнечного излучения в год. В качестве значений азимута по умолчанию рассматриваются значения к экватору, то есть юг (180°) для северного полушария и север (0°) для южного полушария.

Данные пользователя

Местоположение (сайт): Интересующий сайт можно найти по значениям широты и долготы, введя адрес прямого просмотра и нажатия на карту.

¹⁹ <https://globalsolaratlas.info>

Тип фотоэлектрической системы. Рассматриваются три типа фотоэлектрической системы: (i) небольшие жилые помещения; (ii) коммерческие объекты среднего размера; и (iii) наземные крупномасштабные.

Размер системы: учитывается общая мощность постоянного тока (установленная мощность) фотоэлектрической системы. Она представляет собой сумму номинальной мощности фотоэлектрических модулей, установленных и подключенных на площадке (земля, крыша или фасад). Мощность системы (или номинальная мощность модуля в стандартных условиях испытаний) указывается в кВт п (киловатт-пик).

Азимут: ориентация фотоэлектрических модулей. Рассматриваются значения от 0° до 360°, где север представлен 0° или 360°, восток - 90°, юг - 180° и запад - 270°.

Наклон: наклон фотоэлектрических модулей измеряется от горизонтальной поверхности в качестве эталона. Значение между 0° и 90°, где 0° представляет горизонтальную поверхность и 90° вертикальную поверхность.

Ресурс **GEOMODEL SOLAR**²⁰ поддерживает планирование, финансирование и эксплуатацию фотоэлектрических, концентрированных фотоэлектрических и концентрированных солнечных энергетических систем. GEOMODEL SOLAR предоставляет надежные и точные данные о солнечном, метеорологическом и солнечном электричестве, которые используются на протяжении всего жизненного цикла солнечных электростанций, от разведки до разработки и эксплуатации. С 2010 года GEOMODEL SOLAR разрабатывает и эксплуатирует платформу для быстрого доступа к историческим, недавним и прогнозным данным практически для любого местоположения на Земле. GEOMODEL SOLAR может использоваться на коммерческой основе.

В связи с тем, что данная работа посвящена единой методологии оценки валового и технического потенциала для энергии ветра и солнца, не вдаваясь в детали разработки конкретных проектов, и является первой попыткой ее внедрения в странах СНГ для достижения сопоставимости национальных статистических данных, результаты, представленные ниже, основаны на базе данных NASA POWER. На следующих этапах разработки методологии следует использовать более совершенные базы данных.

3.2. Оценка природных ресурсов и валового потенциала солнечной энергии

Поскольку БД NASA POWER содержит для каждой ячейки сетки 0,5°×0,5° уже расчетные значения природных ресурсов солнечной энергии, для оценки природных ресурсов солнечной энергии рассматриваемой территории необходимо воспользоваться формулой:

$$H_{тер.}^{All} = \sum_{j=1}^m (H_j^{All} \cdot S_j / S_{общ.тер.}) \quad (1)$$

где

$H_{тер.}^{All}$ – среднегодовая дневная сумма суммарной солнечной радиации, падающая на единицу горизонтальной поверхности рассматриваемой территории, кВт·ч/м²·день;

H_j^{All} – среднегодовая дневная сумма суммарной солнечной радиации, падающая на единицу горизонтальной поверхности в j -ой ячейке, кВт·ч/м²·день;

S_j – площадь рассматриваемой территории, попадающая в j -ю ячейку, км²;

$S_{общ.тер.}$ – общая площадь рассматриваемой территории, км².

²⁰ <https://solargis.com>

Валовый потенциал солнечной энергии рассматриваемой территории рассчитывается по формуле:

$$P_{вал.тер.} = 10^{-6} \cdot H_{тер.}^{All} \cdot S_{общ.тер.} \cdot D_{год} \quad (2)$$

где

$P_{вал.тер.}$ – валовый потенциал солнечной энергии рассматриваемой территории, *млн. кВт·ч/год*;

$D_{год} = 365$ – количество дней в году, *день*.

3.3. Рекомендуемый формат предоставления данных о природных ресурсах и валовом потенциале солнечной энергии

Форматы БД природных ресурсов и валового потенциала солнечной энергии рассматриваемых территорий приведены в Таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Формат базы данных природных ресурсов солнечной энергии

Рассматриваемая территория	Природные ресурсы солнечной энергии, <i>кВт·ч/м²·день</i>
Муниципальное образование	
Регион (область, край и т.д.)	
Страна	
Зона энергоснабжения, в том числе:	
<i>ЕЭС</i>	
<i>ОЭС</i>	
<i>ИЭС</i>	
<i>Децентрализованная</i>	

Таблица 3 – Формат базы данных валового потенциала солнечной энергии

Рассматриваемая территория	Общая площадь, км ²	Валовый потенциал солнечной энергии, млн. кВт·ч/год
Муниципальное образование		
Регион (область, край и т.д.)		
Страна		
Зона энергоснабжения, в том числе:		
ЕЭС		
ОЭС		
ИЭС		
Децентрализованная		

3.4. Оценка технического потенциала солнечной энергии

Технический потенциал преобразования энергии солнца в электрическую энергию для рассматриваемой территории рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{тех.тер.}} = P_{\text{вал.тер.}} \cdot (KPD_{\text{мод}} \cdot H \cdot KPD_{\text{инв}} \cdot KPD_{\text{тр}} \cdot K_{\text{зем}}) \quad (3)$$

где

$P_{\text{тех.тер.}}$ – технический потенциал солнечной энергии рассматриваемой территории, млн. кВт·ч/год;

$KPD_{\text{мод}}$ – КПД солнечного модуля. Средний КПД современных солнечных модулей составляет около 20-22 % в стандартных условиях (спектр АМ 1,5, 1000 Вт/м², 25 °С);

H – количество модулей, установленных на рассматриваемой территории

$KPD_{\text{инв}}$ – КПД инвертора (97-98 %);

$KPD_{\text{тр}}$ – КПД повышающего трансформатора до 10-110 кВ (96-99 %);

$K_{\text{зем}}$ – территориальный коэффициент, отражающий долю от общей площади рассматриваемой территории, на которой можно устанавливать преобразователи солнечной энергии.

3.5. Рекомендуемый формат предоставления данных о техническом потенциале солнечной энергии

Формат БД технического потенциала солнечной энергии рассматриваемых территорий приведен в Таблице 4.

Таблица 4 – Формат базы данных технического потенциала солнечной энергии

Рассматриваемая территория	$K_{\text{зем}}$	Технический потенциал солнечной энергии, млн. кВт·ч/год
Муниципальное образование		
Регион (область, край и т.д.)		
Страна		
Зона энергоснабжения, в том числе:		
ЕЭС		
ОЭС		
ИЭС		

4. Оценка природных ресурсов, валового и технического потенциала энергии ветра

4.1. Рекомендуемые источники данных для оценки природных ресурсов, валового и технического потенциалов энергии ветра

В предлагаемой методологии в качестве источников исходной информации о распределении (повторяемости) скоростей ветра по грациям рекомендуется использовать БД США NASA POWER и БД Глобального Атласа Ветра (GWA 2.0).

4.1.1. База данных NASA POWER

БД NASA POWER²¹ разработана в рамках проекта «Всемирное прогнозирование энергетических ресурсов» (POWER). Все характеристики ветра в представленной БД приведены как в виде климатических значений, которые получены на основе данных, взятых из модели ассимиляции MERRA-2 за период 1.01.1984-31.12.2013 (30 лет), так и в формате временных рядов среднесуточных значений, построенных с использованием данных моделей ассимиляции MERRA-2 и GEOS 5.12.4.

Данные MERRA-2 охватывают период времени с 1.01.1981 по настоящее время (за исключением нескольких предшествующих месяцев), данные GEOS 5.12.4 – с окончания потока данных MERRA-2 по настоящее время (за исключением нескольких предшествующих дней). Значения из MERRA-2 и GEOS 5.12.4 первоначально генерируются на глобальной сетке, покрывающей всю поверхность Земли с шагом $1/2^\circ$ широты и $2/3^\circ$ долготы, а затем в рамках проекта POWER билинейно интерполируются на глобальную сетку с пространственным разрешением $0,5^\circ$.

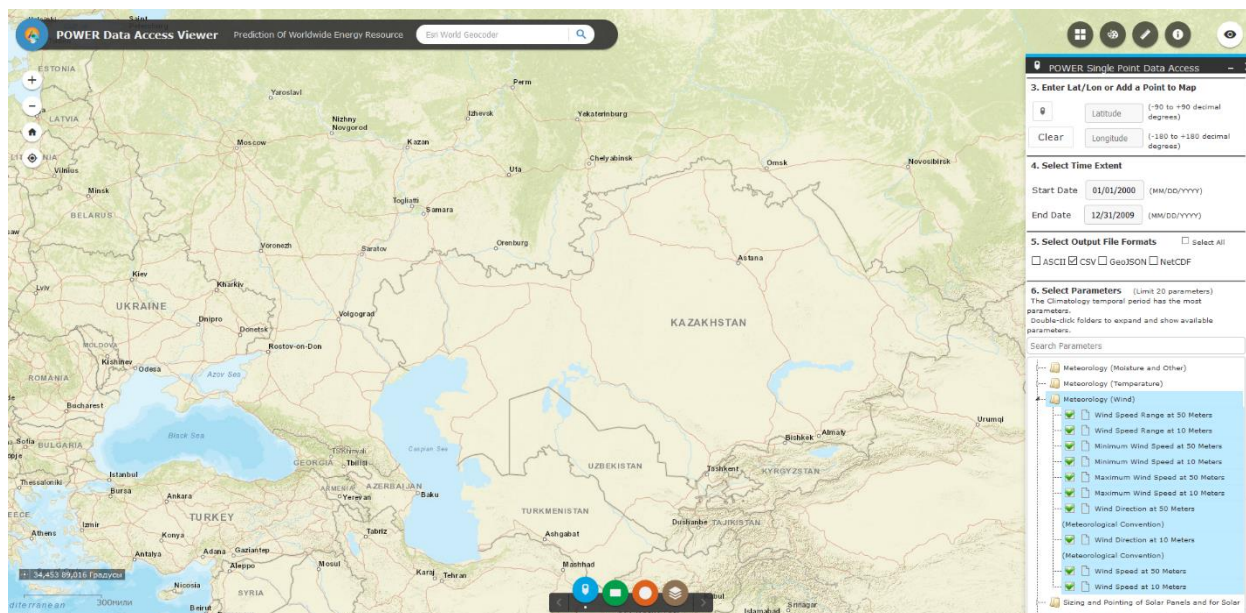


Рис.9. Карта «POWER Data Access Viewer» с окном «POWER Single Point Data Access» для ввода координаты точки и периода оценки

²¹ <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

В настоящее время в БД NASA POWER отсутствуют данные о повторяемости скоростей ветра по градациям, хотя приведенная документация²² подразумевает наличие данного показателя. Возможно, ведутся работы по формированию этого массива данных, и в перспективе он будет доступен для пользователя.

При необходимости повторяемость может быть рассчитана самостоятельно с использованием временного ряда среднесуточных значений скорости ветра. Для этого рекомендуется воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Для заданной точки скачать среднесуточные значения скоростей ветра на высоте 50 м за период не менее 10 лет (Рис. 9-10).
2. Все значения скоростей ветра разнести по диапазонам (градациям), например: от 0 до 2 м/с включительно, от 2,1 до 6 м/с включительно и т.д. Для повышения точности расчетов можно выбрать более мелкие диапазоны, например: 0-1, 1-2 м/с и т.д.
3. Посчитать число случаев, когда скорость ветра попадает в каждый диапазон, и поделить его на общее количество дней выбранного периода. Определяется повторяемость в % или долях единицы.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	-BEGIN HEADER-													
2	NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/GEOS 5.12.4 (FP-IT) 0.5 x 0.5 Degree Daily Averaged Data													
3	Dates (month/day/year): 01/01/2000 through 12/31/2009													
4	Location: Latitude 41.3266 Longitude 69.3051													
5	Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 556.42 meters Site = na													
6	Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)													
7	Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999													
8	Parameter(s):													
9	WS50M MERRA2 1/2x1/2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)													
10	-END HEADER-													
11	LAT,LON,YEAR,MO,DY,WS50M													
12	41.32661	69.30511	2000	01	01	2.98								
13	41.32661	69.30511	2000	01	02	2.69								
14	41.32661	69.30511	2000	01	03	2.94								
15	41.32661	69.30511	2000	01	04	3.61								
16	41.32661	69.30511	2000	01	05	4.66								
17	41.32661	69.30511	2000	01	06	4.73								
18	41.32661	69.30511	2000	01	07	5.50								
19	41.32661	69.30511	2000	01	08	5.43								
20	41.32661	69.30511	2000	01	09	2.26								

Рис.10. Таблица данных среднесуточных значений скорости ветра на высоте 50 м для выделенной координаты (на примере г. Ташкента) за период с 01.01.2000-31.12.2009

Чтобы упростить процедуру оценки ветроэнергетических ресурсов в течение периода уточнения в БД NASA POWER этого информационного массива, предлагается использовать разработанную в рамках проекта «Поверхностная метеорология и солнечная энергия» БД NASE SSE, которая является ее прототипом.

БД NASE SSE предоставляет для сетки $1^\circ \times 1^\circ$, покрывающей весь земной шар, информацию о средней за месяц/год повторяемости скоростей ветра по градациям на высоте 50 м над поверхностью земли, которая получена на основе данных, взятых из модели ассимиляции GEOS-1 за период 01.07.1983-30.06.1993 (10 лет).

Информация о повторяемости скоростей ветра на высоте 50 м из БД NASA SSE прилагается на электронных носителях.

²² https://power.larc.nasa.gov/documents/POWER_Data_v9_methodology.pdf

4.1.2. Глобальный Атлас Ветра (GWA 2.0)

Глобальный Атлас Ветра (GWA 2.0)²³ – это бесплатный электронный ресурс, разработанный Департаментом Ветроэнергетики Датского технического университета (DTU Wind Energy) в партнерстве с Группой Всемирного банка. GWA 2.0 предоставляет возможность работы с глобальной базой данных, которая содержит информацию о так называемом «обобщенном» или «региональном» ветровом климате для сетки, покрывающей всю земную поверхность и часть акваторий (на расстоянии до 30 км от берега) с пространственным разрешением 9 км.

Представленный массив был получен DTU Wind Energy в результате процесса «обобщения» данных мезомасштабного моделирования, проведенного компанией Vortex SL с применением собственной технологии, основанной на Модели исследования и прогнозирования погоды (WRF). В качестве источника исходных данных использовалась база реанализа ERA-Interim²⁴, охватывающая период наблюдений с 1979 года.

Концепция «обобщенного» ветрового климата является ключевым элементом разработанной DTU Wind Energy методологии Атласа, которая полностью изложена в Европейском Атласе Ветров²⁵.

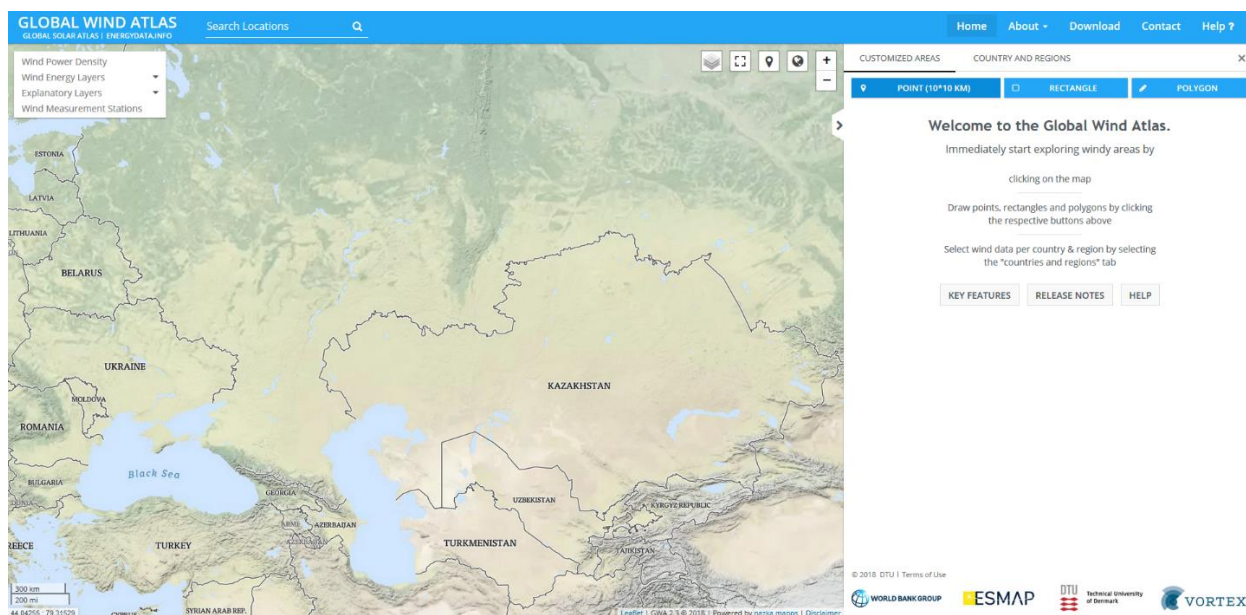


Рис.11. Карта Global Wind Atlas (GWA 2.0)

Информация о ветроклиматических условиях приводится в отдельном для каждой ячейки сетки файле GWC. Общий формат файла GWC и его пример показаны в Таблице 5 и на Рис.12 соответственно.

Таблица 5 – Общий формат файла GWC

Строка	Содержимое
1	Global Wind Atlas 2.0 (WRF 9-km) ix: XXX, iy: YYY <coordinates>lat,lon,height</coordinates>
2	Количество классов шероховатости поверхности, высот и секторов направлений ветра в наборе данных Значения: 5, 5 и 12
3	Коэффициенты шероховатости поверхности [м] Значения: 0.00, 0.03, 0.10, 0.40, 1.50 м
4	Высоты над поверхностью земли [м]

²³ <https://globalwindatlas.info/>

²⁴ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

²⁵ http://orbit.dtu.dk/files/112135732/European_Wind_Atlas.pdf

	Значения: 15, 50, 80, 100 и 200 м
5	Повторяемости направлений ветра для класса шероховатости #1 (0 м)
6	Параметры А распределения Вейбулла для высоты #1 (15 м) в [м/сек]
7	Параметры k распределения Вейбулла для высоты #1 (15 м)
8-9	Параметры А и k распределения Вейбулла для высоты #2 (50 м)

Продолжение Таблицы 5

10-11	Параметры А и k распределения Вейбулла для высоты #3 (80 м)
12-13	Параметры А и k распределения Вейбулла для высоты #4 (100 м)
14-15	Параметры А и k распределения Вейбулла для высоты #5 (200 м)
16-26	Та же информация, приведенная в строках 5-15, но для класса шероховатости #2 (0,03 м)
27-37	Та же информация, приведенная в строках 5-15, но для класса шероховатости #3 (0,1 м)
38-48	Та же информация, приведенная в строках 5-15, но для класса шероховатости #4 (0,4 м)
49-59	Та же информация, приведенная в строках 5-15, но для класса шероховатости #5 (1,5 м)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Global Wind Atlas 2.0 (WRF 9-km) ix: 2794, iy: 1420 <coordinates>52.833,53.167,0.0</coordinates>											
2	5 5 12											
3	0.000	0.030	0.100	0.400	1.500							
4	15.0	50.0	80.0	100.0	200.0							
5	7.97	7.89	5.24	4.34	5.69	9.10	10.71	13.56	10.49	9.11	8.52	7.51
6	6.88	6.80	5.97	6.60	7.08	8.11	8.64	8.53	7.84	7.22	6.96	7.42
7	2.244	2.053	1.971	2.158	2.182	2.119	2.432	2.080	2.232	2.193	2.189	2.197
8	7.50	7.42	6.52	7.48	8.22	9.11	9.40	9.27	8.71	7.97	7.80	8.07
9	2.385	2.182	1.998	2.322	2.482	2.256	2.502	2.209	2.490	2.393	2.650	2.357
10	7.91	7.81	6.81	7.75	8.79	9.87	10.13	10.08	9.31	8.45	8.15	8.53
11	2.342	2.139	1.768	1.967	2.174	2.170	2.502	2.365	2.432	2.385	2.502	2.463
12	7.98	7.94	6.84	7.61	8.81	10.12	10.37	10.38	9.51	8.54	8.14	8.32
13	2.326	2.154	1.740	1.787	2.033	2.127	2.455	2.424	2.443	2.338	2.373	2.162
14	7.50	7.45	6.35	6.37	7.96	10.35	11.21	11.74	9.84	8.56	7.75	7.51
15	1.916	1.826	1.482	1.311	1.557	1.689	2.025	2.334	2.100	1.885	2.014	1.729
16	9.25	7.15	4.90	4.40	5.97	9.95	11.50	14.14	7.41	10.02	7.96	7.72
17	5.60	4.97	4.69	5.40	5.65	6.39	6.64	6.00	5.66	5.84	5.31	5.88
18	2.146	1.846	1.830	1.990	1.775	1.932	1.998	1.639	1.861	2.010	1.971	1.975
19	6.56	5.83	5.62	6.67	7.47	7.94	8.12	7.68	7.13	6.99	6.48	6.98
20	2.443	2.021	2.045	2.436	2.521	2.436	2.518	2.295	2.436	2.443	2.600	2.342
21	7.46	6.64	6.26	7.59	8.50	9.22	9.29	8.75	8.20	7.93	7.31	7.68
22	2.811	2.115	1.939	2.369	2.400	2.635	2.814	2.420	2.631	2.639	2.807	2.334

Рис.12. Таблица параметров распределения Вейбулла для различных направлений ветра, высот над поверхностью земли и классов шероховатости поверхности

В Глобальном Атласе по возобновляемым источникам энергии IRENA²⁶ создана специальная платформа для представления данных GWA. В настоящее время на сайте IRENA размещена старая версия Атласа GWA 1.0 и ведутся работы по его обновлению.

Здесь следует отметить, что, несмотря на выход нового продукта, GWA 1.0²⁷ все еще заслуживает внимания и также может использоваться для оценки ресурсов, поскольку содержит весь необходимый для этого набор данных об «обобщенном» ветровом климате,

²⁶ <https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#tool/38>

²⁷ <http://science.globalwindatlas.info/map.html>

практически аналогичный GWA 2.0 (за исключением высот 15 и 80 м). Информация приводится для каждой ячейки сетки, покрывающей всю поверхность Земли с шагом $1/2^\circ$ широты и $2/3^\circ$ долготы. При работе над GWA 1.0 были задействованы данные реанализов CFDDA, CFSR и MERRA.



Рис.13. Карта Global Wind Atlas (GWA 1.0)

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что БД GWA 2.0 позволяет без привлечения дополнительного инструментария проводить ветроэнергетические расчеты сразу на нескольких высотах и в разы более высокого разрешения по сравнению с БД NASA, однако во столько же раз возрастает и трудоемкость проводимого анализа. Неудобство добавляет и тот факт, что в БД GWA 2.0 можно скачивать файлы GWC только по одному, отдельно для каждого узла сетки. БД GWA 1.0 в этом плане более удобна для использования, т.к. позволяет единовременно выгружать архив файлов для всего выделенного на карте участка местности.

В настоящее время ведется работа по созданию новой версии Атласа GWA 3.0, пространственное разрешение которого будет составлять уже 3 км и включать акватории, прилегающие к берегам на расстояния до 200 м. В качестве источника данных используется база реанализа ERA5²⁸.

4.2. Оценка природных ресурсов энергии ветра

Оценка природных ресурсов энергии ветра проводится с использованием такого показателя, как плотность энергии ветрового потока, под которой понимается средняя мощность воздушной струи, протекающей в единицу времени через поперечное сечение площадью в один квадратный метр:

$$N_{y\partial} = \frac{1}{2} \rho \cdot \sum_{i=1}^n (u_i^3 \cdot t_i) \quad (4)$$

где

$N_{y\partial}$ – плотность энергии (удельная мощность) ветрового потока, Bm/m^2 ;

ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$;

u_i – средняя скорость ветра на i -ом интервале скоростей ветра, $м/с$;

²⁸ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

t_i – часть времени, в течение которого скорость ветра находится в i -ом интервале скоростей.

Для расчета средневзвешенного по территории значения $N_{уд}$ рассматриваемую территорию целесообразно представить в виде совокупности зон, в каждой из которых ветроклиматические условия можно считать условно однородными:

$$N_{уд.тер.} = \sum_{j=1}^m (N_{уд.j} \cdot S_j / S_{общ.тер.}) \quad (5)$$

где

$N_{уд.тер.}$ – плотность энергии ветрового потока на рассматриваемой территории, $Вт/м^2$;

$N_{уд.j}$ – плотность энергии ветрового потока в j -ой зоне, $Вт/м^2$;

S_j – площадь рассматриваемой территории, попадающая в j -ю зону, $км^2$;

$S_{общ.тер.}$ – общая площадь рассматриваемой территории, $км^2$.

При работе с БД NASA в качестве такой «условно-однородной» зоны принимается ячейка $1/2^\circ \times 1/2^\circ$ (NASA POWER) или $1^\circ \times 1^\circ$ (NASA SSE), при работе с БД GWA – ячейка 9×9 км (GWA 2.0) или $1/2^\circ \times 2/3^\circ$ (GWA 1.0).

4.3. Рекомендуемый формат предоставления данных о природных ресурсах энергии ветра

Формат БД природных ресурсов энергии ветра рассматриваемых территорий приведен в Таблице 6.

Таблица 6 – Формат базы данных природных ресурсов энергии ветра

Рассматриваемая территория	Плотность энергии ветрового потока, $Вт/м^2$
Муниципальное образование	
Регион (область, край и т.д.)	
Страна	
Зона энергоснабжения, в том числе:	
ЕЭС	
ОЭС	
ИЭС	
Децентрализованная	

4.4. Оценка валового потенциала энергии ветра

Методические подходы к оценке валового потенциала энергии ветра базируются на постулатах классической теории идеальной ВЭУ, отражающей фундаментальные особенности аэродинамического взаимодействия воздушного потока и ветроколеса. В соответствии с этой теорией установкой даже самой совершенной конструкции в полезную работу может быть преобразована только часть кинетической энергии набегающего на нее ветрового потока, которая характеризуется коэффициентом использования энергии ветра, равным 0,593. Поскольку указанное значение было выведено независимо друг от друга немецким физиком Альбертом Бетцом (1919 г.) и российским профессором Н.Е. Жуковским (1920 г.), довольно часто его также именуют коэффициентом Жуковского-Бетца.

Валовый потенциал энергии ветра рассматриваемой территории – это часть средне-многолетней суммарной энергии ветрового потока, которая может быть максимально использована в течение года идеальными ВЭУ при их размещении по всей площади рассматриваемой территории:

$$P_{вал.тер.} = 10^{-9} \cdot N_{уд.тер.} \cdot S_{ом} \cdot k_{Ж-Б} \cdot T_{год} \cdot N_{ВЭУ общ.} \quad (6)$$

$$S_{ом.} = \pi \cdot D_{БК}^2 / 4 \quad (7)$$

где

$P_{вал.тер.}$ – валовый потенциал энергии ветра рассматриваемой территории, млн. кВт·ч/год;

$S_{ом}$ – площадь поверхности, ометаемой ветроколесом, м²;

$k_{Ж-Б} = 0,593$ – коэффициент Жуковского-Бетца (коэффициент использования энергии ветра идеальной ВЭУ);

$T_{год} = 8760$ – количество часов в году, час;

$D_{БК}$ – диаметр ветроколеса ВЭУ, м;

$N_{ВЭУ общ.}$ – количество ВЭУ, которое можно разместить на всей рассматриваемой территории, шт.

Общее количество ВЭУ $N_{ВЭУ общ.}$ определяется схемой их размещения, которая выбирается таким образом, чтобы минимизировать ветровое экранирование ВЭУ. Кроме того необходимо учитывать возможности землепользования, расстояния до жилых домов и электросети, перепады высот на местности и пр. Но поскольку речь идет об укрупненной оценке ветроэнергетических ресурсов, а не о проектировании ВЭС в конкретной местности, для расчета величины $N_{ВЭУ общ.}$ рекомендуется использовать широко применяемую схему размещения ВЭУ в узлах квадратной сетки со стороной квадрата $10D_{БК}$:

$$N_{ВЭУ общ.} = (1000 / (10 \cdot D_{БК}))^2 \cdot S_{общ.тер.} \quad (8)$$

4.5. Рекомендуемый формат предоставления данных о валовом потенциале энергии ветра

Форматы БД общей площади и количества ВЭУ и валового потенциала энергии ветра рассматриваемых территорий приведены в Таблицах 7 и 8 соответственно.

Таблица 7 – Формат базы данных общей площади и количества ВЭУ

Рассматриваемая территория	Общая площадь, км ²	Количество ВЭУ, шт.
Муниципальное образование		
Регион (область, край и т.д.)		
Страна		
Зона энергоснабжения, в том числе:		
ЕЭС		
ОЭС		
ИЭС		
Децентрализованная		

Таблица 8 – Формат базы данных валового потенциала энергии ветра

Рассматриваемая территория	Валовый потенциал энергии ветра, млн. кВт·ч/год
----------------------------	--

Муниципальное образование	
Регион (область, край и т.д.)	
Страна	
Зона энергоснабжения, в том числе:	
ЕЭС	
ОЭС	
ИЭС	
Децентрализованная	

4.6. Оценка технического потенциала энергии ветра

Технический потенциал энергии ветра рассматриваемой территории – это часть среднесуточной суммарной энергии ветрового потока, которая может быть преобразована в электрическую энергию при существующем уровне развития технологий в течение года на потенциально доступной площади рассматриваемой территории:

$$P_{\text{тех.тер.}} = 10^{-6} \cdot T_{\text{год}} \cdot N_{\text{ВЭУ дост.}} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_i \cdot t_{ij} \cdot S_j / S_{\text{общ.тер.}}) \quad (9)$$

где

$P_{\text{тех.тер.}}$ – технический потенциал энергии ветра рассматриваемой территории, *млн. кВт·ч/год*;

P_i – технический параметр конкретной модели ВЭУ, выдаваемый производителем и характеризующий количество электрической энергии, которое вырабатывает установка при скорости ветра u_i , *кВт*;

t_{ij} – часть времени, в течение которого скорость ветра в j -ой зоне находится в i -ом интервале скоростей;

$N_{\text{ВЭУ дост.}}$ – количество ВЭУ, которое можно разместить на потенциально доступной площади рассматриваемой территории, *шт.*

Для определения значения $N_{\text{ВЭУ дост.}}$ рекомендуется принимать аналогичную схему размещения и модель расчета количества ВЭУ, что и при оценке валового потенциала:

$$N_{\text{ВЭУ дост.}} = (1000 / (10 \cdot D_{\text{БК}}))^2 \cdot S_{\text{дост.тер.}} \quad (10)$$

где

$S_{\text{дост.тер.}}$ – потенциально доступная площадь рассматриваемой территории, *км²*.

4.7 Рекомендуемый формат предоставления данных о техническом потенциале энергии ветра

Формат БД технического потенциала энергии ветра представлен в Таблице 9.

Таблица 9 – Формат базы данных технического потенциала энергии ветра

Рассматриваемая территория	Технический потенциал энергии ветра, <i>млн. кВт·ч/год</i>
Муниципальное образование	
Регион (область, край и т.д.)	
Страна	
Зона энергоснабжения, в том числе:	

ЕЭС	
ОЭС	
ИЭС	
Децентрализованная	

Оценку ветроэнергетических ресурсов рекомендуется проводить на разных высотах. Это обусловлено тем, что при параллельной работе с энергосистемой в условиях развитой транспортной инфраструктуры, как правило, используются ВЭУ единичной мощности 2-3 МВт с высотой оси ветроколеса 100-120 м; в энергоизолированных узлах – ВЭУ единичной мощности ~1 МВт с высотой оси ветроколеса 50 м; в зонах децентрализованного электро-снабжения, в особенности, расположенных в удаленных регионах, – ВЭУ единичной мощности от десятков до сотен кВт с высотой оси ветроколеса не более 30 м.

В существующих БД, к сожалению, отсутствуют исчерпывающие данные о вертикальном профиле повторяемости скоростей ветра, что приводит к невозможности проведения оценки ветроэнергетических ресурсов на всем интересующем диапазоне высот оси ветроколеса. Поэтому для полноценной работы с представленными БД необходима разработка дополнительных методических подходов, с помощью которых, опираясь на имеющиеся данные на базовой высоте (или наборе базовых высот), можно определить распределение скоростей ветра на любой другой высоте.

Одна из таких методик, хорошо согласующаяся с БД NASA SSE, приведена в Приложении.

5. Оценка топливного и экологического потенциалов (эффектов) ВИЭ

5.1. Оценка топливного потенциала (эффекта) ВИЭ

Топливный потенциал ВИЭ рассчитывается по формуле:

$$B = P_{\text{тех.мер.}} \cdot b_{\text{э}} \quad (11)$$

где

B – топливный потенциал ВИЭ, т у.т./год ;

$P_{\text{тех.мер.}}$ – технический потенциал ВИЭ, $\text{млн. кВт} \cdot \text{час/год}$;

$b_{\text{э}}$ – удельный расход топлива на выработку электроэнергии на ТЭС, $\text{г у.т./кВт} \cdot \text{ч}$.

Исходной информацией о фактических значениях коэффициента $b_{\text{э}}$ служат официальные отчетные данные об удельных расходах топлива на ТЭС, публикуемые в документах Исполнительного комитета ЭЭС СНГ, в том числе:

- Ежегодном сборнике «Электроэнергетика Содружества Независимых Государств»;
- сводных отчетах о мониторинге «Дорожной карты по ключевым экологическим вопросам объединения электроэнергетических рынков ЕС и СНГ».

Таблица 10 – Динамика удельных расходов топлива на отпуск электроэнергии на ТЭС государств-участников СНГ²⁹ за период с 2000 по 2016 год, $\text{г у.т./кВт} \cdot \text{ч}$

Государства-участники СНГ	2000	2005	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Азербайджанская Республика	411,3	378,8	327,9	317,6	313,5	314,2	303,6	293,5	291,96	285,73
Республика Армения	373	390,7	384,1	304,0	285,0	299,4	289,2	298,0	285,3	283,1
Республика Беларусь	274,8	274,6	267,7	268,9	264,3	254,6	256,1	246,8	235,5	230,4
Республика	385,0	362,2	350,8	352,2	355,0	360,1	361,9	378,2	382,1	382,5

²⁹ Сводный отчет за 2015-2016гг

Казахстан										
Кыргызская Республика	262,5	252,4	409,9	403,0	405,7	407,0	401,1	411,8	417,1*	424,7*
Республика Молдова	346,0	н.д.	н.д.	279,4	249,5	254,5	250,2	238,6	299,4	227,9
Российская Федерация	341,2	334,3	333,1	334,4	330,6	334,0	328,7	325,5	322,8	319,3
Республика Таджикистан	326,6	269,9	341,8	440,7	405,2	388,4	360,2	441,8	219,7	364,4
Туркменистан	371,0	439,6	452,2	461,6	444,8	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Республика Узбекистан	379,5	381,0	383,6	379,9	378,9	379,8	374,1	375,56	374,89	375,81

5.2. Оценка экологического потенциала ВИЭ

5.2.1. Оценка предотвращённых выбросов парниковых газов

Так как на ТЭС более 99% выбросов ПГ составляют выбросы CO_2 , то оценку предотвращённых выбросов парниковых газов рекомендуется проводить только по этому парниковому газу.

Валовые выбросы CO_2 рекомендуется определять по формуле:

$$M_{\text{CO}_2} = K_G \cdot B_G + K_Y \cdot B_Y + K_M \cdot B_M \quad (12)$$

где

B_G, B_Y, B_M – расход природного газа, угля и мазута соответственно, замещаемый соответствующим топливным потенциалом ВИЭ, т у.т. ;

K_G, K_Y, K_M – коэффициенты эмиссии (удельные выбросы CO_2) при сжигании природного газа, угля и мазута соответственно, $\text{т}(\text{CO}_2)/\text{т у.т.}$.

Количественные значения коэффициентов эмиссии рекомендуется принять равными: $K_G = 1,62$; $K_Y = 2,76$; $K_M = 2,28$. Данные значения получены на основании Инвентаризации выбросов парниковых газов ТЭС РАО ЕЭС России, учитывают практически все виды сжигаемого твёрдого топлива в странах СНГ и подтверждены международной независимой экспертизой.

5.2.2. Оценка предотвращённых выбросов загрязняющих веществ

Экологический потенциал ВИЭ рассчитывается по формуле:

$$M = 10^{-3} \cdot B \cdot K \quad (13)$$

где

M – объём (масса) предотвращённых выбросов ЗВ, т/год ;

B – топливный потенциал ВИЭ, т у.т./год ;

K_{NO_x} – коэффициент эмиссии (удельный выброс) оксидов азота при сжигании природного газа, угля, мазута, кг/т у.т. ;

K_{SO_2} – коэффициент эмиссии (удельный выброс) диоксида серы при сжигании угля, мазута, кг/т у.т. ;

$K_{\text{TЧ}}$ – коэффициент эмиссии (удельный выброс) твёрдых частиц (золы) при сжигании угля, кг/т у.т. .

Количественные значения удельных выбросов ЗВ ($K_{\text{NO}_x}, K_{\text{SO}_2}, K_{\text{TЧ}}$) необходимо принимать с учётом сжигаемого на рассматриваемой территории органического топлива. С этой целью рекомендуется использовать нормативные значения коэффициентов эмиссии для вновь вводимых и реконструируемых котельных установок, приведенные в ГОСТ Р

50831-95 и ТР «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках ТЭС» (Таблицы 11-16).

ГОСТ Р 50831-95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования» утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта Российской Федерации от 25 октября 1995 г. N 553.

Таблица 11 – Нормативы удельных выбросов в атмосферу твёрдых частиц (золы) для вновь вводимых и реконструируемых котельных установок

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паро- производительность котла D, т/ч)	Приведенное содержание золы A _{пр} , %·кг/МДж	Выброс твердых частиц, кг/т у.т.
До 299 (до 420)	менее 0,6	1,76
	0,6-2,5	1,76-2,93
	более 2,5	2,93
300 и более (420 и более)	менее 0,6	0,59
	0,6-2,5	0,59-1,76
	более 2,5	1,76

Таблица 12 – Нормативы удельных выбросов в атмосферу SO₂ для вновь вводимых и реконструируемых котельных установок

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводи- тельность котла D, т/ч)	Приведенное содержание серы S _{пр} , %·кг/МДж	Выброс SO ₂ , кг/т у.т.
До 199 (до 320)	0,045 и менее	14,7
	более 0,045	17,6
200-249 (320-400)	0,045 и менее	11,7
	более 0,045	13,1
250 и более		8,8

Таблица 13 – Нормативы удельных выбросов в атмосферу NO_x для вновь вводимых и реконструируемых котельных установок

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводи- тельность котла D, т/ч)	Вид топлива	Выброс NO _x , кг/т у.т.
До 299 (до 420)	Газ	1,26
	Мазут	2,52
	Бурый уголь	3,20
	Каменный уголь:	
	ТШУ	4,98
	ЖШУ	6,75
300 и более (420 и более)	Газ	1,26
	Мазут	2,52
	Бурый уголь	3,20
	Каменный уголь:	
	ТШУ	3,81
	ЖШУ	6,16

Технический регламент «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций» утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 14 декабря 2007 г. № 1232 с изменениями, внесенными постановлением Правительства РК от 21.07.2010 № 747.

Таблица 14 – Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу твердых частиц для твердого топлива всех видов

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Приведенное со- держание золы A _{пр} , %·кг/МДж	Массовый выброс твердых частиц, кг/т у.т.		
		действующие котельные уста- новки ТЭС до реконструкции	реконструируе- мые и вновь вво- димые котель- ные установки на действующих ТЭС с 1 января 2013 г.	котельные уста- новки вновь строящихся ТЭС с 1 января 2013 г.
До 299 (до 420)	Менее 0,6	8,21	1,76	1,76
	0,6-2,5	8,21-10,56	1,76-5,86	1,76-2,93
	Более 2,5	10,56	5,86	2,93
300 и более (420 и более)	Менее 0,6	7,04	1,18	0,59
	0,6-2,5	7,04-14,08	1,18-4,70	0,89-1,76
	Более 2,5	14,08	4,70	1,76
1180 и более (1650 и более)	0,6-2,5	14,08-18,77	1,18-4,70	1,18-2,36

Таблица 15 – Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов серы для твердых и жидких видов топлива

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Приведенное со- держание серы S _{пр} , %·кг/МДж	Массовый выброс SO _x , кг/т у.т.		
		действующие котельные уста- новки ТЭС до реконструкции	реконструируе- мые и вновь вво- димые котель- ные установки на действующих ТЭС с 1 января 2013 г.	котельные уста- новки вновь строящихся ТЭС с 1 января 2013 г.
До 199 (до 320)	0,045 и менее	25,7	25,7	14,7
	Более 0,045	44,0	44,0	17,6
200-249 (320-400)	0,045 и менее	25,7	25,7	11,7
	Более 0,045	44,0	44,0	13,1
250-299 (400-420)	0,045 и менее	25,7	25,7	8,8
	Более 0,045	44,0	44,0	8,8
300 и более (420 и более)	0,045 и менее	25,7	25,7	8,8
	Более 0,045	38,0	38,0	

Таблица 16 – Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов азота для твердых, жидких и газообразных видов топлива

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Вид топлива	Массовый выброс NO _x , кг/т у.т.		
		действующие котельные установки ТЭС до реконструкции	реконструируемые и вновь вводимые котельные установки на действующих ТЭС с 1 января 2013 г.	котельные установки вновь строящихся ТЭС с 1 января 2013 г.
До 299 (до 420)	Газ	3,54	2,58	1,26
	Мазут	4,16	3,02	2,52
	Бурый уголь:			
	ТШУ	6,60	5,47	3,20
	ЖШУ	7,15	6,05	3,20
	Каменный уголь:			
	ТШУ	7,28	6,10	4,98
300 и более (420 и более)	ЖШУ	9,10	7,49	6,75
	Газ	4,05	2,93	1,26
	Мазут	5,21	3,64	2,52
	Бурый уголь:			
	ТШУ	6,60	6,27	3,20
	ЖШУ	–	–	–
	Каменный уголь:			
	ТШУ	9,10	6,96	3,81
	ЖШУ	11,24	8,56	6,16

6. Методологические основы и принципы развития региональных программ реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии

6.1. Принципы разработки и реализации региональных программ

Региональные программы и проекты реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии являются действенным инструментом обоснованного развития данного вида энергоснабжения и способствуют привлечению заинтересованных сторон, принимающих решения на региональном и более высоких уровнях. Хотя методы и подходы в зависимости от масштабов проекта и региональных различий могут отличаться, ряд основных факторов успеха может быть обобщен для определения последовательных этапов, направленных на успешную реализацию проектов.

Базовыми методологическими принципами разработки и реализации региональных программ в современных условиях являются:

- обоснованное и реалистичное целеполагание;
- комплексность и синхронность целей и задач программы на каждом этапе ее выполнения;
- целевая направленность и системность мероприятий программы;
- вариантная разработка мероприятий программы с учетом альтернативности условий ее реализации;
- ресурсная обеспеченность программы;
- адресность заданий программы (исполнители, сроки, контрольные показатели и т.п.);
- обеспечение управляемости программы (создание необходимых правовых, организационных и финансовых механизмов).

6.2. Структура программы

Проект программы должен включать:

- цели и задачи программы, конкретизированные качественно и количественно;
- этапы и сроки выполнения программы;
- обоснование финансовых и других затрат;
- расчеты социально-экономической эффективности и оценку экологических последствий;
- характеристику механизмов осуществления программы (необходимые нормативно-правовые и институциональные изменения, систему стимулирования и привлечения финансовых ресурсов, организацию управления программой и контроль над ходом ее выполнения);
- сведения о государственных заказчиках и исполнителях программы.

6.3. Основные этапы разработки и реализации программы

Условно можно выделить 5 этапов разработки программы, в том числе:

1. Комплексный анализ исходных данных и разработка концепции;
2. Оценка потенциалов возобновляемой энергетики;
3. Оценка экологического и топливного эффектов реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии;
4. Описание мер, которые могут быть использованы для реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии;
5. Мониторинг реализации программы.

Успешная реализация программ и проектов ветровой и солнечной энергетики в значительной степени зависит от обоснованной постановки общих целей и задач. В процессе подготовки программы с использованием разнообразных аналитических методов разрабатывается концепция, содержащая различные сценарии и прогнозы потенциального спроса на энергию в регионе.

Этап программы «комплексный анализ исходных данных и разработка концепции» базируется на результатах создаваемой надежной базы данных для проведения технического анализа и разработки сценариев развития. Анализ энергетического потенциала ветровой и солнечной энергии, существующего положения и потенциальных возможностей региональной энергетики и экономики являются центральными элементами общего технического анализа. Результаты анализа позволяют получить правильное представление об оценке сценариев и вариантов программы, в том числе технически неподготовленным заинтересованным сторонам и лицам, принимающим решения. На основании анализа ситуации, потенциальных возможностей и сценариев развития разрабатывается конкретная программа реализации.

После завершения разработки проекта программы заказчик организует согласование предусмотренных в нем мероприятий и источников финансирования с министерствами и ведомствами, местными органами власти, предпринимательскими структурами исполнителями программы. Проводится экспертиза программы, а по ее результатам – соответствующая доработка.

На этапе мониторинга рассматриваются и контролируются экономические аспекты программы, обеспечение качества, а также осуществляется при необходимости корректировка и оптимизация процессов в ходе реализации программы.

Заключение

Комитету ЕЭК по устойчивой энергетике поручено осуществлять мероприятия, ориентированные на конкретные результаты, в том числе «II. Сферы деятельности: (с) Возобновляемые источники энергии». В соответствии с инициативой Генерального секретаря ООН «Устойчивая энергия для всех» ЕЭК ООН сосредоточила свое внимание на мероприятиях, которые помогут увеличению освоения возобновляемых источников энергии в регионе и достижению цели «доступность энергии для всех» в регионе ЕЭК (ECE / EX / 2013 / L.15).

Представленные в данной работе аналитические материалы и предложения по единой методологии оценки природных ресурсов, валовых и технических потенциалов ветровой и солнечной энергии в странах СНГ, рекомендуемым форматам предоставления данных, методологическим основам и принципам развития региональных программ реализации потенциалов ветровой и солнечной энергии могут стать полезной основой для укрепления трансграничного сотрудничества в этом секторе энергетики.

Основной исходной информацией для оценки ветроэнергетического потенциала являются данные по распределению (повторяемости) скоростей ветра по градациям, которые получают путем статистической обработки результатов наблюдений, проводимых на метеорологических (МС) и аэрологических станциях (АЭ), а также с применением спутниковых методов зондирования атмосферы.

По ряду объективных причин измерения параметров ветра выполняются для весьма ограниченного набора высот. Так, в случае наиболее развитой и обширной сети МС замеры производятся только на уровне флюгера (10-20 м). Отсутствие исчерпывающих данных о вертикальном профиле повторяемости скоростей ветра при наличии на мировом рынке широкого ассортимента ветроэнергетических установок (ВЭУ) с различными техническими характеристиками приводит к невозможности проведения анализа вероятностных характеристик скоростей ветра на всем диапазоне высот оси ветроколеса и, как следствие, эффективного выбора оборудования при проектировании централизованной или распределенной системы энергоснабжения в конкретной местности.

Именно подобное несоответствие между «спросом и предложением» на информацию такого рода породило необходимость в разработке данной методики. Ее ключевая идея заключается в определении параметров функции плотности вероятностей скоростей ветра на различных высотах над поверхностью земли на основе следующих данных измерений в q -й точке территории:

- повторяемости $p_{jh_{\delta аз. q}}$ скоростей ветра на базовой высоте $h_{\delta аз. q}$ для интервалов градации из множества J^{unt} ;
- средней скорости ветра $u_{ср. h_{\delta аз. q}}$ на этой высоте;
- коэффициента шероховатости подстилающей поверхности α_q .

Для этого в качестве закона распределения случайной величины было выбрано двухпараметрическое распределение Вейбулла, которое широко используется в отечественной и зарубежной практике для аппроксимации фактической повторяемости скоростей ветра.

Функция плотности вероятности Вейбулла имеет вид:

$$f(u) = \frac{K}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^K},$$

где u – скорость ветра, м/с; A – параметр масштаба (скоростной), м/с; K – безразмерный параметр формы кривой.

Легко показать, что интегральная функция распределения Вейбулла может быть записана как

$$F(u) == \int_0^u \frac{K}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^K} dv = 1 - e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^K},$$

где v – переменная, задающая скорость ветра.

Имеется полученная экспериментальным путем информация о повторяемости скоростей ветра $p_j = p_{jh_{\delta аз. q}}$ на множестве $J^{unt} = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ интервалов градаций скоростей ветра на базовой высоте $h_{\delta аз. q}$ над поверхностью земли в географической точке q с конкретными координатами и верхних границах $u_j = u_{jh_{\delta аз. q}}$ каждого j -го интервала градации.

Ставится задача определить параметры $A = A_{\delta аз. q}$ и $K = K_{\delta аз. q}$ функции Вейбулла на базовой высоте.

Для поиска решения вводится функция

$$\phi(u) = 1 - F(u) = e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^K},$$

которая затем дважды логарифмируется:

$$\ln(-\ln \phi(u)) = \ln(-\ln(1 - F(u))) = K \ln u - K \ln A$$

Используя результаты эксперимента $F(u_j) = \sum_{i=1}^{i=j} p_i$ (для $\forall j \in J^{um}$) это выражение можно представить в следующем виде:

$$\ln(-\ln(1 - \sum_{i=1}^{i=j} p_i)) = K \ln u_j - K \ln A,$$

а после ввода обозначений:

$$y_j = \ln(-\ln(1 - \sum_{i=1}^{i=j} p_i)), x_j = \ln u_j, a = K, b = -K \ln A$$

$$\text{как } y_j = ax_j + b$$

Имеет смысл искать неизвестные коэффициенты a и b , а через них и параметры функции Вейбулла, используя критерий минимума среднеквадратичного отклонения прогнозируемых по соотношению $y = a \cdot x + b$ значений от результатов эксперимента, т.е. путем минимизации функции

$$\Phi(a, b) = \sum_{j=1}^n [y_j - (ax_j + b)]^2$$

Использование метода наименьших квадратов (МНК) позволяет определить значения параметров функции плотности вероятности Вейбулла

$$K = K_{\delta az, q} = \frac{c_1 c_{22} - c_2 c_{12}}{c_{11} c_{22} - c_{21} c_{12}}$$

$$A = A_{h_{\delta az, q}} = e^{\frac{c_{11} c_2 - c_{21} c_1}{c_1 c_{22} - c_2 c_{12}}},$$

где $c_{11} = \sum_{j=1}^n x_j^2$, $c_{12} = \sum_{j=1}^n x_j$, $c_1 = \sum_{j=1}^n y_j x_j$, $c_{21} = \sum_{j=1}^n x_j$, $c_{22} = n$, $c_2 = \sum_{j=1}^n y_j$.

Применение МНК для определения параметров линейного регрессионного уравнения, а затем и параметров функции Вейбулла, в отличие от используемых графических методов, позволяет осуществлять статистическую оценку результатов аппроксимации эмпирической гистограммы формулой Вейбулла.

Математическое ожидание $M(U)$ случайного значения скорости ветра U является начальным моментом первого порядка v_1 , соответствует среднему значению скорости u_{cp} и записывается в виде следующего интеграла:

$$M(U) = v_1 = \int_0^{+\infty} u \frac{K}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^K} du$$

Путем преобразований исходного интегрального выражения начальный момент первого порядка был представлен в виде более простого и удобного для дальнейшего использования интеграла

$$v_1 = \int_0^{+\infty} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^K} du = A \int_0^{+\infty} e^{-w^K} dw,$$

где $w = u/A$, или эквивалентного ему соотношения с применением гамма-функции Γ

$$v_1 = A \frac{1}{K} \Gamma\left(\frac{1}{K}\right)$$

Анализ доступной статистической информации позволил сделать заключение о низкой статистической значимости влияния высоты воздушной струи на значение параметра

формы кривой К в фиксированной точке территории при наличии существенных погрешностей в исходных данных.

В связи с этим при выполнении большинства оценочных расчетов может быть сделано допущение о постоянстве значения параметра формы кривой на разных высотах от поверхности земли в фиксированной точке территории, т.е. $K_{h_{баз. q}} = K_{hq} = K_q = const$. Отсюда следует, что для начальных моментов l -го порядка $v_l(U_1) = M(U_1)$ и $v_l(U_2) = M(U_2)$ двух любых случайных величин U_1 и U_2 , имеющих распределение вероятности Вейбулла с одинаковыми значениями параметра формы, отношение этих моментов равняется отношению скоростных параметров A_1 и A_2 функции Вейбулла, т.е.

$$\frac{v_1(U_1)}{v_1(U_2)} = \frac{M(U_1)}{M(U_2)} = \frac{A_1}{A_2},$$

а при известном значении параметра A_1 первой случайной величины значение параметра A_2 второй случайной величины может быть определено как

$$A_2 = \frac{M(U_2)}{M(U_1)} A_1 \text{ и } A_2 = \frac{u_{cp.2}}{u_{cp.1}} A_1$$

или

$$A_h = \frac{u_{cp.h}}{u_{cp.h_{баз. q}}} A_{h_{баз. q}}$$

Если задана зависимость средней скорости ветра $u_{cp.h_q}$ на высоте h_q в q -й точке территории от средней скорости ветра $u_{cp.h_{баз. q}}$ на высоте $h_{баз. q}$ в той же точке, то при известном значении $A_{h_{баз. q}}$ на базовой высоте появляется возможность определения A_{h_q} на высоте h_q . Одной из достаточно распространенных зависимостей такого рода является степенная функция вида

$$u_{cp.h_q} = \left(\frac{h_q}{h_{баз. q}} \right)^{\alpha_q} u_{cp.h_{баз. q}}$$

с показателем степени α_q , характеризующим уровень шероховатости подстилающей поверхности в точке измерения.

Ориентируясь на полученные результаты, можно показать, что масштабные скоростные параметры функции Вейбулла для разных высот над поверхностью земли в q -й точке территории связаны следующим соотношением

$$A_{h_q} = \left(\frac{h_q}{h_{баз. q}} \right)^{\alpha_q} A_{h_{баз. q}}$$

Таким образом, зная параметры функции распределения вероятностей скоростей ветра на базовой высоте $h_{баз. q}$ можно определить значения этих параметров на любой заданной высоте h_q .