

АТЛАС РЕСУРСОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМА



Рецензенты:

Сухова Мария Геннадьевна, доктор географических наук, профессор, Горно-Алтайский государственный университет
Попель Олег Сергеевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН

Редакторы: Киселева С. В., Горбунов Р. В., Рафикова Ю. Ю.

А92 Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории Крыма. – Севастополь – Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2023. – 103 с.: ил.

Атлас подготовлен специалистами ФИЦ ИнБЮМ, МГУ имени М.В. Ломоносова и ОИВТ РАН. В предлагаемом Атласе, помимо карт, освещена история исследований возобновляемых энергетических ресурсов Крыма, приведены источники данных и методики оценки ресурсов и потенциалов производства энергии с использованием следующих возобновляемых источников на территории Крыма: солнца, ветра, малых водных потоков, биомассы сельскохозяйственных отходов.

Атлас предназначен для широкого круга специалистов, потенциальных инвесторов, федеральных и региональных органов исполнительной власти, российских и зарубежных разработчиков и производителей оборудования, генерирующих и сетевых компаний, профильных высших учебных заведений, научных организаций, инновационных территориальных кластеров, институтов развития и др.

УДК 620.9(292.471)
ББК 31.6(237)

Рекомендовано к печати учеными советами

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (протокол № 4 от 21.03. 2023)
и географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (протокол № 2 от 03.03. 2023)

Авторский коллектив:

Андреев Т. И., к.б.н., старший научный сотрудник географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова
Горбунов Р. В., д.г.н., директор ФИЦ ИнБЮМ
Горбунова Т. Ю., к.г.н., научный сотрудник НИЦ геоматики ФИЦ ИнБЮМ
Киселева С. В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова
Келип А. А., ведущий инженер НИЦ геоматики ФИЦ ИнБЮМ
Рафикова Ю. Ю., к.г.н., старший научный сотрудник географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова
Фрид С. Е., к.т.н., ведущий научный сотрудник ОИВТ РАН
Шакун В. П., инженер географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Содержание

Введение	4
Глава 1. История исследования ресурсов и потенциалов возобновляемой энергии на территории Крыма	5
1.1. Исследования ресурсов и потенциалов солнечной энергии	5
1.2. Исследования ресурсов и потенциалов ветровой энергии	7
1.3. Исследования гидроэнергетического потенциала	10
1.4. Исследования ресурсов и потенциалов энергии биомассы	12
Глава 2. Источники данных и методы оценки ресурсов и потенциалов возобновляемой энергии на территории Крыма	14
2.1. Источники данных и методы оценки ресурсов и технического потенциала солнечной энергии	14
2.2. Источники данных и методы оценки ресурсов и технического потенциала ветровой энергии	15
2.3. Источники данных и методы оценки энергии малых водных потоков	15
2.4. Источники данных и методы оценки ресурсов, валового и технического потенциалов биоэнергетики	16
Глава 3. Карты ресурсов, валового и технического потенциалов отдельных видов возобновляемых источников энергии на территории Крыма	20
Заключение	21
Список литературы	101

Глава 1.

История исследований ресурсов и потенциалов возобновляемой энергии на территории Крыма

Для конкретизации объекта исследований, которому посвящен Атлас, важно определить основные понятия, а именно: ресурсы и потенциалы возобновляемой энергии (или возобновляемых источников энергии). В научной литературе обычно нет четко обозначенного различия в терминах «ресурсы» и «потенциалы» возобновляемых источников энергии. В данной работе, как и в предыдущих исследованиях [48], авторы будут связывать термин «ресурсы» с физическими носителями энергии возобновляемых источников, а именно, приходящей солнечной радиацией, движением воздушных и водных масс, биомассой органических отходов. Соответственно характеристиками ресурсов будут выступать их доступные физические объемы: мощность и/или суточные суммы приходящей солнечной радиации, скорости и повторяемости ветра, масса органических отходов, образующихся в течение года и т.д. Под термином «потенциалы» в работе будет пониматься энергия, заключенная в этих ресурсах. Для подчеркивания энергетической направленности исследования нами также используется термин «энергетический потенциал». При этом в Атласе дифференцированы понятия «валовый» и «технический» потенциалы ВИЭ. Согласно [84], валовый потенциал ВИЭ – это годовой объем энергии, который содержится в данном виде возобновляемого источника при полном ее превращении в полезную энергию; технический потенциал ВИЭ – это часть валового потенциала, преобразование которого возможно при современном уровне развития техники и соблюдении требований по охране окружающей среды. При этом технический потенциал солнечной и ветровой энергии в Атласе приведен в виде удельной производительности конкретных типов современных фотоэлектрических и ветровых энергоустановок, что обеспечивает возможность практического применения представленных результатов.

1.1. Исследования ресурсов и потенциалов солнечной энергии

Проведенные исследования ресурсов и солнечного энергетического потенциала существенно различаются как по использованным методикам и исходным данным, так и по результатам. Ряд работ, хотя и посвящён оценке потенциала солнечной энергетики на территории Крыма, но дают лишь качественное его описание и конкретных значений потенциала не содержит [24, 25, 26, 80]. Это обстоятельство делает актуальным анализ и сопоставление использованных ранее методик и полученных результатов для территории Крымского полуострова. Результаты проведенного нами сравнительного анализа оценок солнечного потенциала Крымского полуострова отражены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оценок среднегодового потенциала солнечной энергии для территории Крымского полуострова

Потенциал				Источник
Валовый, млрд. МВтч в год	Удельный валовый, кВтч/м ² в год	Технический, млн. МВтч в год	Экономический, млн. МВтч в год	
	1350–1435; 1941–1955			[83]
	1361–1477			[65]
	1386–1477			[49]
	1072–1386			[75]
	1360–1477			[74]
	1300–1450			[91]
	1400,28			[63]
	менее 1389 – более 1472			[10, 51]
3,2	1400	6		[89]
	1306–1444			[50]
	1250–1400			[60]
36,5	1400 и выше	175	0,27	[12]
32,2	1386–1477			[82]
	1350–1431			[81]
		1,82		[25, 29, 76, 77]
	до 1500			[2]
	1879–1932			[88]
		3,1		[59]
	1460			[66]
	1460–2007,5			[11]

Наземные измерения и исследования приходящей солнечной радиации на территории Крыма в течение длительного времени проводились вне привязки к нуждам и запросам возобновляемой энергетики. Лишь с середины XX века начало расти число работ, анализирующих солнечный потенциал с позиций получения тепловой и электрической энергии. Среди основополагающих исследований метеорологов стоит выделить многолетние актинометрические измерения, которые проводятся на трех метеостанциях Крымского полуострова: Евпатория, Никитский Сад, Карадаг. Результаты этих исследований изложены в Справочнике по климату СССР [83], который содержит информацию о пространственно-временном распределении отдельных элементов климата на территории бывшей Украинской ССР на основании метеорологических наблюдений. Материал

представлен в виде таблиц с пояснениями к ним. Годовые суммы радиация на метеостанции Евпатория составляют 120,3 ккал/см², Карадаг – 123,4 ккал/см², Никитский Сад – 116,1 ккал/см². При условии ясного неба эти значения увеличиваются: Карадаг – 166,9 ккал/см², Никитский Сад – 168,1 ккал/см². (Здесь и далее мы будем приводить оценки с размерностью, предложенной в оригинальных работах; в таблице 1 для целей сравнительного анализа результаты приведены нами к единой размерности). В [65] среднее годовое количество суммарной солнечной радиации оценивается в диапазоне от 117 до 127 ккал/см². Причем продолжительность солнечного сияния превышает 2100 часов в год и достигает 2525 часов на 5% территории. П. Д. Подгородецкий [74] отмечал, что несмотря на небольшую территорию полуострова, значения суммарной радиации изменяются довольно значительно – от 4897 МДж/м² в год в районе Белогорска до 5317 МДж/м² в год в Черноморском.

Ряд исследований посвящён пространственным, сезонным и многолетним вариациям поступающей солнечной радиации. Так, в [49] собраны материалы, характеризующие климатические условия Крыма, а также представлены основные закономерности пространственно-временного распределения метеорологических явлений в Крыму.

Значения годовой суммарной солнечной радиации варьируют по территории полуострова от 4994 МДж/м² на севере до 5317 МДж/м² на западе, что вполне соответствует результатам [74]. В монографии [50], где описывается особенность климата Крымского полуострова и предпосылки его формирования, суммарная солнечная радиация приводится в диапазонах (с востока на запад полуострова) от 4700 до 5200 МДж/м² в год. Наибольшие значения суммарной радиации достигаются в июне – июле и составляют 542–766 МДж/м² в месяц. Авторы отмечают значительные колебания радиации в разные годы. Так, среднеквадратичное отклонение годовой суммарной радиации колеблется в пределах 180–430 МДж/м². Согласно [81], суммарная солнечная радиация изменяется от 4861,1 МДж/м² в год в Никитском Ботаническом Саду до 5150 МДж/м² в год на Карадаге и на западном побережье (Евпатория).

Вариациям приходящей солнечной радиации в Крыму посвящена работа [36]. Однако для анализа взяты не актинометрические данные, а модельные, рассчитанные на основе солнечной геометрии и измеренной продолжительности солнечного сияния в течение месяца на метеостанции Херсонесский маяк. На этой основе авторами сделан вывод о том, что за 40-летний период (с 1961 по 1998 гг.) в Крыму произошло уменьшение годового поступления солнечной радиации.

В монографии [88] при описании природных факторов трансформации водного баланса Крымского полуострова авторы указывают значения суммарной радиации от 6764 МДж/м² в год на севере (в районе Перекопского перешейка) до

6955 МДж/м² в год на крайнем юге при безоблачном небе, что существенно превышает приведенные выше оценки, а также результаты, приведенные в атласах [10, 51]. В этих атласах величина суммарной солнечной радиации изменяется от менее чем 5000 МДж/м² в год в центральных районах до чуть более 5300 МДж/м² в год на западном побережье. Авторы подчеркивают, что имеют место значительные колебания солнечной радиации от года к году в связи с ходом облачности и циркуляционными процессами в атмосфере. В [32] приведены сезонные карты среднесуточных величин суммарной радиации, построенные по данным наземных метеонаблюдений. Так, в январе она составляет от 3 до 4 МДж/м², в апреле – от 15 до 16,5 МДж/м², в июле – от 22 до 23 МДж/м², в октябре – от 9,5 до 10,5 МДж/м².

Картографическое представление ресурсов солнечной энергии на территории Крыма дано также в [75], где приходящая суммарная солнечная радиация на территории Крыма варьирует от 3860 до 4990 МДж/м² в год. На этой основе авторы обсуждали рентабельность использования солнечной энергии в энергетике с учетом занятости значительных территорий под сельскохозяйственное производство и возможные микроклиматические изменения при строительстве крупных солнечных электростанций. В качестве наиболее оптимальных поверхностей для размещения установок предлагается использовать крыши и стены зданий, а также крутые склоны возвышенностей и гор, которые не используются в хозяйстве. Таким образом, в данной работе авторы подошли к задаче учёта ограничивающих факторов и оценки технического потенциала солнечной энергии.

Широкие исследования, посвящённые комплексной оценке солнечных ресурсов с позиций производства энергии, относятся ко второй половине XX века. З. И. Пивоваровой и В. В. Стадник в работе [73] было проведено районирование территории СССР по потенциалу солнечной радиации. В качестве основного показателя обеспеченности гелиоресурсами взято среднее по площади 5° трапеции значение приходящей суммарной радиации. Также в [73] были рассчитаны и приведены следующие важные для проектирования солнечных станций показатели: доля прямой радиации в суммарной; повторяемость суточных сумм суммарной радиации; годовое число часов с мощностью суммарной радиации 600 Вт/м² и более; коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации. Согласно разработанным на этой основе картам, территория Крымского полуострова была отнесена к районам с наибольшим потенциалом солнечной энергии.

Районирование территории было проведено также в работе Л. П. Федосенко, О. Г. Денисенко, С. А. Кудри, С. В. Маргалик, которые исследовали характеристики режима солнечной радиации на территории Украинской ССР для оценки возможности выработки тепловой и электрической энергии [91]. Значения суммарной солнечной радиации варьируются по территории Крыма в диапазоне 1300–1400 кВт·ч/м² в год с максимумом в Евпатории (1450 кВт·ч/м² в год).

Наиболее крупной работой по оценке потенциала солнечной энергетики в Крыму за период 2000-х годов стала работа группы экспертов TESIS, результаты которой опубликованы в коллективной монографии «Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века» [89]. При мощности суммарной солнечной радиации, равной 1400 кВтч/м² в год, природный (валовый) потенциал солнечной энергетики Крыма оценивался как 3,2 млрд. МВтч в год, технический потенциал – 6 млн. МВтч в год. Вместе с тем, входивший в группу экспертов С. А. Кудря несколько позже снизил оценку технического потенциала солнечной энергетики до 0,38 млн. т у.т. в год, что соответствует 3,1 млн. МВтч в год [59].

В 2008 г. вышла в свет фундаментальная работа «Атлас энергетического потенциала возобновляемых источников энергии Украины» [12], в котором была проведена оценка энергетического потенциала всех возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Согласно Атласу, среднегодовой поток суммарной солнечной радиации на территории Крымского полуострова составляет 1400 кВт·ч/м² и выше. Валовый солнечный потенциал для всей территории полуострова – 36,5 млрд. МВтч в год, технический потенциал – 175 млн. МВтч в год, а целесообразный экономический потенциал – 0,27 млн. МВтч в год.

Комплексные исследования сотрудников ведущих научных центров и высших учебных заведений Крыма отражены в [82]. Важно отметить, что при описании валового солнечного энергетического потенциала территории Крыма, авторы ссылаются на работу [89], однако в результате дают совершенно другие значения – 32,2 млрд. МВтч в год. Удельные значения поступающей солнечной радиации составляют 1386–1477 кВтч/м² в год. В работе А. Р. Абдуллаева [2], посвященной анализу существующих объектов возобновляемой энергетики и мероприятиям по увеличению производительности энергоустановок, а также в [60, 63, 66] приводятся достаточно близкие к указанным значения суммарной солнечной радиации – 1250–1500 кВтч/м² в год.

В 2010 г. была принята «Программа энергосбережения в Автономной Республике Крым на 2010–2014 годы» [76], согласно которой годовой технически достижимый потенциал солнечной энергии Крыма составляет 1,82 млн. МВтч. Эти же величины потенциала приводятся в работах [2, 60, 65].

В Атласе ресурсов возобновляемой энергетики на территории России [11] для всей территории РФ, в том числе, для Крымского полуострова, приведены удельные величины ресурсов всех видов ВИЭ; содержится описание методик и результаты расчетов валовых и технических потенциалов с детализацией до административных субъектов РФ. Авторы рассчитали приход суммарной солнечной радиации на различные поверхности: горизонтальную, вертикальную, оптимально ориентированную, с углом наклона равным широте, (широта – 15°), (широта + 15°). Среднегодовая суммарная солнечная радиация, приходящая на наклонную поверхность (угол наклона равен широте) на территории Крымского

полуострова, согласно этому источнику, составляет 4–5,5 кВтч/м² в день и увеличивается с востока на запад полуострова.

Таким образом, сравнительный анализ исследований солнечного энергетического потенциала Крымского полуострова показывает, что оценки удельного прихода (потока) суммарной солнечной радиации достаточно близки. Гораздо реже оценивался валовый солнечный энергетический потенциал территории, причем результаты на порядок отличаются друг от друга – 3,2 млрд. МВтч в год [89], 32,2 млрд. МВтч в год [82] и 36,5 млрд. МВтч в год [12]. Данные по техническому потенциалу также разнятся между собой: от 1,82 млн. МВтч в год до 175 млн. МВтч в год. Однако такого рода оценки для территории крупных регионов в целом имеют ограниченную применимость. Потребителю в настоящее время гораздо важнее иметь представление о потенциальной удельной производительности современных типовых фотоэлектрических модулей в заданной точке, а также вариациях этой производительности в течение года. В связи с этим в разделе предлагаемого Атласа, посвященном ресурсам и потенциалам солнечной энергии, приведены значения приходящей солнечной радиации и удельной (рассчитанной на 1 Вт пиковой мощности) производительности трех типов современных фотоэлектрических модулей.

1.2. Исследования ресурсов и потенциалов ветровой энергии

Активное изучение ветрового энергетического потенциала (ВЭП) Крымского полуострова началось с 20-х годов XX столетия. В 1923 г. сотрудниками Центрального аэрогидродинамического института Н. В. Красовским и Г. Х. Сабининым было подсчитано общее количество ветряных двигателей на территориях губерний европейской России, их плотность и вероятная средняя установленная мощность [58]. И хотя количественных данных отдельно по Таврической губернии в работе [58] приведено не было, в картографическом виде в этой работе была представлена средняя плотность ветродвигателей по губерниям европейской части России, в том числе и Таврической (до 25 ветродвигателей на 1000 кв. верст). На карту были нанесены также изолинии скоростей ветра для зимнего периода.

Таким образом, Н. В. Красовским и Г. Х. Сабининым были даны опосредованные оценки ветроэнергетического потенциала через установленную мощность ветродвигателей на территории Таврической губернии, проведены расчеты технического ветропотенциала и себестоимости энергии. Авторы прогнозировали быстрое развитие ветровой энергетики при совершенствовании конструкции ветряных двигателей и создании поселений с автономным энергообеспечением.

Методика, развитая в [58], была в дальнейшем использована Н. В. Красовским в ряде работ [54–57], в которых проводился расчет скоростей и мощности ветра. Так, в [54] автором была построена карта среднегодовых скоростей ветра

Европейской части СССР на основании данных 1387 метеостанций за период с 1891 по 1909 гг. Данные усреднены по ячейкам и штриховкой показаны преобладающие скорости ветра, которые в Крыму имели значения свыше 5 м/с. Построены гистограммы сравнительного количества энергии ветра, которое можно получить с 1 км² территории и сравнительной стоимости единицы установленной мощности.

М. В. Келлером в конце 20-х годов [45] был произведен расчет мощности воздушной струи единичной площади сечения по данным метеостанций Севастополь и Караби-Яйла. На основе диаграмм повторяемости скорости ветра было проведено сравнение количества энергии, которое обеспечивается средними скоростями и средней повторяемостью ветра, с одной стороны, и большими скоростями, при низкой их повторяемости, с другой. Проведено определение оптимальной для заданных ветровых установок скорости ветра, а также экономических характеристик действующих ветрогенераторов (количество вырабатываемой за год энергии, годовые операционные расходы, динамика произведенной энергии в течение года). Рассмотрены следующие варианты работы ВЭУ: самостоятельная работа без аккумуляирования, с аккумуляированием, с тепловым резервом, работа на общую сеть с аккумуляированием, работа на общую сеть с аккумуляированием только излишков энергии, работа ветровых установок на потребителя большой мощности (промышленные предприятия). Таким образом, работа М. В. Келлера дала научно-обоснованные подходы к развитию ветроэнергетики в 30-е годы в Крыму.

Л. П. Федосенко, О. Г. Денисенко и С. В. Маргалик [90] на основе данных 147 метеостанций УССР о скорости ветра, приведенной к высоте 16 м с использованием логарифмического закона, провели оценку удельной мощности ветрового потока. Авторы определили среднее значение мощности ветра, вводя усредненные месячные коэффициенты неравномерности $K_m = P_m / P_r$ (P_m – среднемесячная ветровая мощность; P_r – среднегодовая ветровая мощность) в каждый месяц на указанной территории. Анализ полученных результатов показал, что мощность ветра более 138 Вт/м², наблюдается на территории Керченского полуострова и Горного Крыма в течение всего года. (Здесь и далее, если нет специальных оговорок, под м² понимается площадка, перпендикулярная направлению распространения воздушной струи. В тексте также используется аналогичный термин «Вт/м² площади, ометаемой ветроколесом»). На Тарханкутском полуострове такая мощность достижима зимой, весной и осенью. На остальной территории полуострова значения мощности ветрового потока изменяются от 17 Вт/м² летом до 138 Вт/м² зимой. Рассчитанные значения мощности ветра в различные сезоны года были нанесены на картосхемы.

Анализ карт [12] показывает, что среднегодовая скорость ветра 5,5 м/с на высоте 10 м наблюдается на Керченском и Тарханкутском полуостровах, в Горном

Крыму. Скорость 5 м/с – в Равнинном Крыму, на остальной территории Крыма среднегодовые скорости ветра не превышают 4 м/с. В работе С. А. Величко [32] были выявлены вариации скоростного режима по сезонам года в местах максимальных ветровых ресурсов (Тарханкутском и Керченском полуостровах), где скорости ветра составляют зимой 5–7 м/с, весной – 5–6 м/с, летом – 4–5 м/с и осенью – 4–7 м/с.

Значения технического ВЭП, согласно [12], распределены в такой же пространственной дифференциации: 3,2 МВтч/м² площади, ометаемой ветроколесом, в год, на Керченском и Тарханкутском полуостровах, в Горном Крыму; 2,81 МВтч/м² в год в равнинном Крыму и 1,12 МВтч/м² в год на остальной территории полуострова. Значения технически достижимого ВЭП составляют, соответственно, 0,62, 0,52 и 0,2 МВтч/м² в год. Здесь величины ВЭП в МВтч/м² в год означают энергию воздушной струи, проносимой через единичную площадку перпендикулярную движению воздуха за год.

В [89] коллективом авторов из группы экспертов TESIS была проведена оценка ВЭП территории Крымского полуострова и выявлены наиболее перспективные участки на основе модели NOABL. Результатом расчетов по модели стала трехмерная картина распределения скоростей ветра. Статистический анализ полученных результатов был проведен с помощью программы WAsP и был верифицирован по 5 метеостанциям Крыма. При выборе наиболее перспективных участков для строительства ветроэлектростанций (ВЭС) в работе учитывались следующие факторы: средняя скорость ветра на высоте 25 м (не менее 5,5 м/с); высота территории над уровнем моря (не выше 1000 м); уклон поверхности (не более 5°); размеры участка (не менее 1 км²). В результате были выделены участки общей площадью 200 км², расположенные по побережью Сивашского залива, на Керченском полуострове, полуострове Меганом, Тарханкут, м. Фиолент. Были составлены т.н. «ветроатласы первого уровня» для высоты 25 м в масштабе 1:200000 и 1:500000. ВЭП выделенных участков оценивался для турбин различной мощности при коэффициенте использования установленной мощности, равном 0,33 и номинальной скорости ветра 15 м/с. В результате проведенных расчетов были получены значения производительности ветротурбин. При введении коэффициентов готовности ветротурбин на уровне 98% (среднеевропейское значение) и 85% (фактическое местное среднее значение) были получены годовые значения выработки энергии от ВЭС для Крыма (таблица 2)..

Таким образом, в [89] были проведены оценки ВЭП территории Крыма, а также рассмотрены экологические аспекты воздействия ВЭС на окружающую среду и человека (визуальное воздействие, шумовой эффект, электромагнитные помехи, угроза гибели птиц и др.).

Анализ распределения скоростей и энергии ветра по территории Крымского полуострова на основе данных Климатического атласа Крыма [51] был проведен

Таблица 2. Прогнозные значения выработки энергии на ВЭС для территории Крыма (по [89])

Удельная мощность ветростанций, МВт/км ²	Годовая выработка энергии, ГВтч/год			
	Коэффициент готовности (средняя мощность турбины)		Коэффициент готовности (большая мощность турбины)	
	(98%)	(85%)	(98%)	(85%)
13	2405	2085	3295	2855
8	1480	1286	2035	1765
5	915	795	1260	1095

в [82]. Принималось, что в перспективных для использования ветра в регионах среднегодовая скорость ветра должна быть более 4–6 м/с. В результате в качестве наиболее богатых ветроэнергетическим потенциалом были определены горные и приморские территории Крымского полуострова. Справедливо указывалось, что для территории Крыма особое внимание при анализе ВЭП должно уделяться характеру рельефа (открытость или закрытость, форма склонов и т.д.), типу растительности, местной циркуляции (горно-долинные ветра, бризы, фены, бора). В работе проведено сравнение значений скорости ветра из нескольких источников данных (Справочник по климату СССР, данные метеорологической станции г. Симферополь, сайты gismeteo.ua, meteo.infospace.ru) за различные временные промежутки. На основе подходов классической аэродинамики, средних значений скорости ветра и данных о количестве дней в году, когда ветровые условия принципиально обеспечивают работу ВЭУ ($V_{\min}=4 \text{ м/с} < V < V_{\max}=25 \text{ м/с}$) были определены значения удельной мощности ветрового потока на территории Крыма. Наибольшей мощностью ветрового потока характеризуется юг Керченского полуострова (от 210 Вт/м² до 313 Вт/м² и более). Также значительные показатели мощности наблюдаются на крайнем северо-северо-западе полуострова и участке Горного Крыма близ г. Судак и г. Ялта (132–210 Вт/м²). Таким образом, в работе представлены результаты оценки теоретической мощности ветрового потока без учета ландшафтных и экологических факторов.

В. М. Головки и Г. П. Душина в [34] провели расчеты производительности ВЭУ по известной повторяемости ветра как

$$E = \sum_{i=1}^n N_i t_i, \quad (1)$$

где N_i – мощность ВЭУ при скорости ветра в пределах i -ой градации; t_i – продолжительность скорости ветра в i -ой градации; n – число градаций скорости ветра; диапазоны скорости ветра – от 4 м/с (начало работы ВЭУ) до 15 м/с (остановка работы ВЭУ).

Были выявлены районы, наиболее перспективные по продолжительности периода с достаточными условиями для использования ветровой энергии: северные районы (Черноморское-Ишунь-Джанкой), горные массивы и Керченский полуостров. Малопригодными районами определены центральная часть полуострова (Почтовое-Симферополь-Белогорск) и Южный берег (Ялта-Алушта). Удельный технический потенциал энергии ветра составил 350–1170 кВтч на м² площади, ометаемой ветроколесом.

В работах В. В. Ефимова с соавторами [40, 41] проведена оценка ВЭП на основе расчетов полей ветра с помощью региональной модели атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением (модель HadRM3H [94]). HadRM3H позволяет провести моделирование динамических процессов в атмосфере и приповерхностном слое в заданном регионе и определить значения скорости ветра на уровне 50 м, температуру воздуха, потоки тепла и влаги с дискретностью 1 час. В качестве исходных данных для численного моделирования был использован реанализ ERA40. Разрешение модели составляет 25×25 км, что может являться основой для последующих локальных оценок ВЭП. Для сравнения расчетных данных реанализа с наземными измерениями скорости ветра авторами были использованы метеостанции Крымского региона (Геничск, Керчь, Новая Каховка, Симферополь, Херсон и Черноморское); показана высокая корреляция расчетных и экспериментальных массивов данных как для температуры (0,9÷0,98), так и скорости ветра (0,69÷0,8). Среднеквадратичное отклонение измеренных и рассчитанных значений скоростей ветра по всем 6 станциям составило 0,33 м/с. Полученное в [40, 41] распределение среднемноголетнего значения ВЭП (удельной мощности ветра) на высоте 50 м, усредненного за климатический период с 1957 по 1997 гг., показало, что максимальное среднегодовое значение ВЭП характерно для Керченского и Тарханкутского полуостровов и составляет 700–800 Вт на м² площади, ометаемой ветроколесом.

В работах А.Р. Абдуллаева [1, 2] технически достижимый энергетический потенциал ветроэнергетики Крыма (возможная установленная мощность) оценен как 5 тыс. МВт, перспективные для использования в ветроэнергетике площади – 2300 км². Это территории, на которых коэффициент использования установленной мощности ветровой электростанции превышает 0,3 (северная часть Керченского полуострова и Тарханкутский полуостров). Кроме этого, перспективным участком является южное побережье залива Сиваш. Повышенным ВЭП также обладают территории в районе г. Симферополь и г. Севастополь. Согласно [3], коэффициент использования установленной мощности на этих территориях превышает 25%.

А.И. Башта в работе [23] на основе данных «Крымэнерго» оценил суммарный ВЭП Крымского полуострова в 10–15 млн. МВтч/год. Согласно [77], эта величина составляет 6,95 млн. МВтч/год.

Таблица 3. Среднегодовые значения характеристик ВЭП для территории Крымского полуострова (источник – [11], высота ветроустановок – 50 м).

Характеристика ВЭП	Значение
Скорость ветра, м/с	5,2–6,2
Плотность энергии ветрового потока, Вт/м ² площади, ометаемой ветроколесом	244–374
Общая продолжительность энергетического затишья в течение года, %	9–26
Годовой валовый потенциал энергии ветра субъекта, млн. МВтч/год	200–400
Годовой технический потенциал энергии ветра субъекта, млн. МВтч/год	30–60

В Атласе ресурсов возобновляемой энергии на территории России [11] на основе базы данных NASA SSE получены оценки плотности энергии ветрового потока, общей продолжительности ветрового затишья в течение года, годовых валового и технического потенциалов энергии ветра территории субъектов РФ, включая Республику Крым (таблица 3). Технический потенциал оценивался на основе расчета годовой производительности современных ВЭУ с высотой 50 м на пространственной сетке с шагом 1°.

При расчете технического ВЭП территории авторы учли в качестве пригодных для размещения ветростанций только земли сельскохозяйственного назначения и земли запаса; при более детальных расчетах на региональном и локальном уровне требуется более детальный анализ структуры земельного фонда исследуемых территорий.

В [47] был предложен алгоритм выбора территорий, пригодных для строительства ВЭС с учетом физико-географических ограничений, экологических норм, эстетической ценности ландшафтов и особенностей современного природопользования. Разработанный алгоритм был апробирован на территории Юго-Восточного Крыма. В результате была построена карта перспективных участков для строительства ВЭС и рассчитан валовый потенциал выделенных участков.

Следует отметить, что в большинстве рассмотренных выше исследований оценки основаны только на данных метеостанции о скоростях и повторяемости ветра [34, 37, 55, 90 и др.]. В [11, 40, 41, 89] использованы различные модели для расчета и пространственного анализа ВЭП. Метеоданные в этих работах являются основой для верификаций применяемых моделей. В качестве характеристик ВЭП в большинстве случаев рассматривались удельная мощность ветрового потока [12, 37, 40, 41, 90] или мощность всех ВЭУ, которые возможно разместить на территории [13]. В [13, 23, 55, 77, 89] приводятся значения валового ВЭП всей территории, причем эти значения существенно различаются между собой. Технический потенциал был рассчитан в [34] как удельный технический потенциал (в расчете на единичную ометаемую площадь), а также в [11], где

приведено значение годового технического потенциала всего Крымского полуострова, равного общей годовой производительности ВЭУ известного типа, занимающих всю территорию. В некоторых из рассмотренных работ полученные результаты были отображены в виде карт.

В целом анализ проведенных количественных оценок и карт показывает достаточно широкий разброс определяемых величин и полученных результатов. Наибольшее число оценок относится к удельной мощности ветрового потока и валовому потенциалу энергии ветра для территории Крыма. Сопоставление результатов затруднено тем, что в рассмотренных работах зачастую не приведены методики определения ВЭП, и сами оценки относятся к различным высотам (10–12 м, 50 м и выше). Результаты определения удельной мощности ветрового потока на высоте метеонаблюдений [37, 82] и удельного технического потенциала [34, 37] согласуются между собой по верхнему пределу оценок (по крайней мере, по порядку величины). Эти результаты можно сопоставить с величинами валового потенциала территории и удельной мощности ветровых потоков из [11, 40, 41], только приняв некоторые допущения относительно роста скорости ветра с высотой. Для оценки достоверности полученных результатов необходимо, по-видимому, использовать данные ветромониторинга на соответствующих высотах.

Как указывалось выше, при характеристике полученных результатов о ресурсах и потенциалах солнечной энергии, при проектировании ВЭС или планировании схем энергоснабжения территорий важно иметь информацию о потенциальной удельной производительности современных ВЭУ в заданной точке или в пространственной сетке, а также вариациях этой производительности в течение года. В связи с этим в разделе предлагаемого Атласа, посвященном ресурсам и потенциалам ветровой энергии, приведены значения скоростей ветра, повторяемости скоростей ветра в важных для проектирования диапазонах, длительность затиший, а также удельной (рассчитанной на 1 Вт пиковой мощности) производительности четырех типов современных ветроэнергетических установок.

1.3. Исследования гидроэнергетического потенциала

Территория России в целом богата водными ресурсами. Суммарный валовый гидроэнергетический потенциал рек России составляет 3084 ТВт·ч (валовая мощность – 352 млн. кВт) [14]. В Крыму развитие гидроэнергетики может быть связано с использованием малых гидроэлектростанций, хотя вопрос этот весьма дискуссионный и требует учёта многих факторов: от физико-географических и социально-экономических предпосылок до технических, экономических и экологических ограничений.

Изучение гидроэнергетического потенциала Крыма имеет вековую историю. Исследованием гидроэнергетических ресурсов крымских рек начали

заниматься в 20-е годы XX века такие крупные учёные, как Д. И. Кочерин [53] и М. В. Келлер [43, 44]. Именно Д. И. Кочерин [53] дал первую обширную сводку о гидроэнергетическом потенциале крымских рек и перспективах его использования. В данной работе были приведены расчеты мощности водного потока 18-ти крупных рек Крыма при трёх вариантах регулирования стока. Было показано, что в среднем за год при регулировании стока эти реки обеспечивают годовую мощность 2700 л.с., без регулирования в тех же условиях можно получить мощность 5000 л.с. в зимний период и около 1000 л.с. – в летний. От малых водотоков (не учтенных в составе рассмотренных крупных рек) можно получить среднюю годовую мощность 4000 л.с.

В середине XX века вопросам исследования гидроэнергетического потенциала рек Крыма были посвящены работы К. И. Юдина [93], А. М. Росщупкина [79]. По расчётам [90], выработка электроэнергии на крымских реках может обеспечить около 25% нужд всего сельского хозяйства. С другой стороны, А. М. Росщупкин [79] отмечал, что гидроэнергетические ресурсы Крыма крайне малы.

Впервые общий гидроэнергетический потенциал рек Крымского полуострова определили эксперты группы TACIS в начале XXI века [46]. Расчётный потенциал гидроэнергетики, по оценкам экспертов, составил 756 МВт, а рекомендуемый технический потенциал на краткосрочную перспективу – 18 МВт. Эти значения используют многие авторы для характеристики гидроэнергетического потенциала рек Крыма [12, 24–27, 46, 59, 61, 62, 76, 87, 89].

А. Н. Олиферов [67, 89] отмечает, что гидроэнергетические ресурсы распределяются по территории Крыма неравномерно. Наибольшие значения гидроэнергетического потенциала сосредоточены в западной части северного макросклона Крымских гор. Например, р. Альма в створе п. Крымгосзаповедник имеет потенциальную мощность 3,256 МВт, мощность р. Кача в створе п. Куйбышево – 4,198 МВт. Самые большие потенциальные мощности гидроэнергии в этом районе имеют р. Коккозка в створе п. Глубинка – 6,651 МВт и р. Черная в створе п. Родниковское – 6,671 МВт.

В работах [27, 86] был произведен расчёт гидроэнергетического потенциала 43 крымских рек, который составил суммарно 78,44 МВт (на порядок меньше, чем в оценках TACIS). Самый большой энергетический потенциал у р. Коккозка – 10,6 МВт. Если рассматривать гидроэнергетический потенциал по группам рек, то наибольшие значения наблюдаются у рек северо-западных склонов Крымских гор – 38,45 МВт.

В [12, 59, 60] общий, технически доступный и экономически целесообразный потенциалы малых рек Республики Крым (в терминах годового производства энергии) были оценены как 211, 139 и 63 млн. кВтч в год, соответственно. Оценки гидроэнергетического потенциала рек Крымского полуострова, представленные в работе Г. А. Бабенко [13] по порядку величин близки к приве-

денным выше и составляют: теоретический потенциал рек – 210 млн. кВтч в год, а рекомендуемый объём использования для малых гидроэлектростанций – 28 млн. кВтч в год. Согласно «Программе энергосбережения в Автономной Республике Крым на 2010–2014 годы» [76], годовой технически достижимый потенциал гидроэнергетики Крыма составляет 140 млн. кВтч. Аналогичные оценки приведены в [25, 29, 77]. В [22] расчётный потенциал гидроэнергетических ресурсов Крыма составляет 200 млн. кВтч в год, что по порядку величин соответствует приведённым выше оценкам. В [82] гидроэнергетический потенциал малых рек Крымского полуострова оценен более высокими значением – 888,4 млн. кВтч в год.

Ряд исследований гидроэнергетического потенциала содержат общие оценки по региону. Так, в [14] была проведена оценка гидроэнергетического потенциала рек России по субъектам Российской Федерации в терминах валового, доступного для освоения и технического гидроэнергетического потенциалов. При расчёте доступного для освоения потенциала были выделены исключительные зоны – неблагоприятные в инженерно-геологическом отношении зоны, зоны особого использования территории, зоны уже освоенного потенциала. В результате валовый (природный) гидроэнергетический потенциал по Крымскому федеральному округу составил 10 МВт, доступный для освоения – 10 МВт, технический – 4 МВт, что существенно ниже приведенных выше оценок. Авторы отмечают, что в расчётах могут быть некоторые неточности, связанные с тем, что в качестве исходных данных использовались карты среднего годового стока рек СССР за 1976 г, а также использовались цифровые модели рельефа SRTM и AsterGDEM, которые имеют определённую ошибку по высоте.

В [15] сделана оценка перспективности гидроэнергетического строительства в регионах Российской Федерации на основе метода анализа иерархий. Были учтены 23 критерия, которые характеризуют состояние экономики, энергетики и социально-демографическую ситуацию в регионе, а также их прогнозные значения. По результатам проведённых расчетов на разработанном авторами ГИС-модуле Крымский полуостров был отмечен как перспективный для гидроэнергетического строительства. Необходимо отметить, что авторы оценивали только социально-экономические показатели регионов, не беря в расчёт гидрологические показатели и экологические ограничения, учёт которых, безусловно, привёл бы к иным результатам в отношении Крыма.

Распределение гидроэнергетического потенциала по территории полуострова отражено в ряде атласов. Так, в [32], где представлены карты распределения гидроэнергетического потенциала малых и средних рек по сезонам года, показано, что в январе энергетический потенциал рек Крыма находится в диапазоне от 0 до 200 кВтч/км² в месяц. В апреле диапазон значений остаётся таким же, однако изолинии равных энергопотенциалов значительно смещены к северу. В