

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

**РЕСУРСЫ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ:  
методы оценки  
и картографирование**

*Коллективная монография*

Москва  
2019

УДК 620  
ББК 31.15  
Р43

*Печатается по решению  
Ученого совета географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

**Рецензенты:**

д-р технич. наук, профессор *Л.П. Безруких*, д-р биол. наук, профессор *Е.И. Голубева*

**Коллектив авторов:**

канд. физ.-мат. наук *С.В. Киселева*, канд. геогр. наук *Ю.Ю. Рафикова*,  
канд. биол. наук *Т.И. Андреевко*, д-р геогр. наук *Б.А. Новаковский*,  
канд. геогр. наук *А.И. Прасолова*

**Р43 Ресурсы возобновляемой энергетики: методы оценки и картографирование** : коллективная монография / С.В. Киселева, Ю.Ю. Рафикова, Т.И. Андреевко, Б.А. Новаковский, А.И. Прасолова. – М. : Наука, 2019. – 194 с. : табл., ил., цв. ил. – ISBN 978-5-6043378-2-0.

Предлагаемая вниманию монография – результат труда коллектива авторов в 2014–2019 гг. по разработке методик оценки и геоинформационного картографирования ресурсов возобновляемой энергетики. В работе представлен детальный обзор существующего опыта применения геоинформационных систем в возобновляемой энергетике: мирового и российского. Особое внимание уделено анализу информационной базы, используемой при оценках ветровой и солнечной энергии, а также методам расчета потенциала возобновляемых источников энергии. Предложена авторская методика пространственной оценки ресурсов солнечной, ветровой энергии и энергии отходов сельского хозяйства на региональном уровне, учитывающая природные, экологические, социально-экономические факторы. Монография также содержит результаты апробации методики на примере территории Юга России.

Издание предназначено для широкой аудитории специалистов в области энергетики, картографии и геоинформатики, экономики природопользования, геоэкологии, преподавателей и научных сотрудников, студентов и аспирантов.

**Renewable energy resources: methods of assessment and mapping** : collective monograph / S.V. Kiseleva, Yu.Yu. Rafikova, T.I. Andreenko, B.A. Novakovsky, A.I. Prasolova – M. : Science, 2019. – 194 p. : tabl, pic., col. pic.

This monograph presents the results of authors work in 2014–2019 on the topic of renewable energy resources mapping. The paper includes a detailed review of the existing experience in the geographic information systems use in renewable energy: global and Russian experience. Particular attention is paid to the analysis of the information base used in assessing wind and solar energy, as well as methods for calculating the potential of renewable energy sources. The authors suggest a method for spatial assessment of solar, wind and agricultural waste resources at the regional level, taking into account natural, environmental, socio-economic factors. The monograph also contains the results of methodology testing on the example of South of Russia territory.

The publication is intended for a wide audience of specialists in the field of energy, cartography and geoinformatics, environmental economics, geoecology, teachers and researchers, students and PhD students.

© Географический факультет МГУ  
имени М.В. Ломоносова, 2019  
© Коллектив авторов, 2019

**ISBN 978-5-6043378-2-0**

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Пространственный анализ в возобновляемой энергетике.....	6
1.1. Возобновляемые источники энергии как объект картографирования .....	6
1.2. Мировой опыт геоинформационного картографирования ресурсов и потенциалов возобновляемых источников энергии .....	11
1.3. Отечественный опыт картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии .....	38
Глава 2. Методические подходы к определению и картографированию ресурсов возобновляемой энергетике .....	52
2.1. Ресурсы солнечной энергии: источники данных и методика определения.....	55
2.2. Ресурсы ветровой энергии: источники данных и методика определения.....	73
2.3. Ресурсы биоэнергетики: источники данных и методики определения .....	88
2.4. Последовательность и особенности региональной оценки и картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии .....	95
Глава 3. Апробация методов оценки и картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии на примере территории Юга России .....	122
3.1. Ресурсы и потенциалы биоэнергетики территории Юга России.....	131
3.2. Ресурсы и потенциалы солнечной и ветровой энергетике территории Юга России .....	140
Заключение .....	151
Литература.....	154
Приложения.....	172

## Введение

Развитие возобновляемой энергетики в России в настоящее время требует решения не только технологических задач, развития правовых основ, обеспечения государственной финансовой поддержки проектов, но и анализа ресурсов различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ)

К возобновляемым источникам энергии обычно относят источники солнечного происхождения (энергия солнечной радиации, гидравлическая энергия рек, энергия ветра, энергия биомассы, энергия океана), несолнечного происхождения (геотермальная энергия, энергия приливов), органические отходы и источники низкопотенциальной тепловой энергии. Поскольку перечень видов ВИЭ очень широк и неоднотипен, в представленной монографии в качестве объектов геоинформационного картографирования выбраны ресурсы солнечной, ветровой энергии и энергии органических отходов. В России в настоящее время именно для электростанций, работающих на основе перечисленных ВИЭ, действуют меры государственной поддержки.

Фактическую основу для исследований ресурсов возобновляемой энергетики (ВЭ) составляют метеорологические и актинометрические данные, а также статистические данные об источниках органических отходов. Ныне – как в мире в целом, так и для территории России – накоплены обширные массивы таких данных, в том числе непосредственными наблюдениями, путем восстановления данных о скорости ветра на различных высотах, температуре воздуха, падающей радиации. Данные Росстата и региональных статистических органов о численности населения, сельскохозяйственном производстве и промышленном производстве в отраслях – источниках органических отходов дают адекватную основу для оценки ресурсной базы биоэнергетики. Важной задачей является их аккумулирование в виде баз данных, верификация, анализ адекватности методов их получения.

Результаты картографирования ресурсов ВИЭ должны отвечать современным практическим запросам, а именно, обеспечивать инструментарий для анализа эффективности

практического использования ВИЭ в различных регионах России и принятия обоснованных технических и управленческих решений. В частности, в методиках картографирования должна быть учтена необходимость отображения – помимо ресурсов ВИЭ – полного спектра предпосылок и ограничений развития ВЭ на региональном уровне. На этой основе возможно осуществлять районирование территорий с целью выбора наиболее перспективных площадок для реализации проектов возобновляемой энергетики.

В монографии представлен анализ и обобщение зарубежного и отечественного опыта геоинформационного картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии, источников данных и существующих методик расчетов ресурсов, валового и технического потенциала. Проведено обоснование тематики карт для обеспечения адекватного представления о ресурсах ВИЭ. Определены и обоснованы типы факторов, влияющих на их использование. На этой основе предложена структура картографического обеспечения для проведения оценки ресурсов, валового и технического потенциала солнечной и ветровой энергии с учетом ограничивающих и способствующих развитию ВЭ факторов. Показан алгоритм, позволяющий методами геоинформационного картографирования выделить наиболее перспективные территории для размещения объектов на ВИЭ. Представлены результаты апробации разработанной методики на тестовых территориях Юга России и – более детального факторного анализа на примере Волгоградской области.

Исследование основано на фундаментальных работах в области картографии и возобновляемой энергетики. Авторы выражают глубокую благодарность коллективам научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии и кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ, а также лаборатории возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН за консультации, критические замечания и предоставленные результаты моделирования работы установок возобновляемой энергетики.

# **Глава 1. Пространственный анализ в возобновляемой энергетике**

## **1.1. Возобновляемые источники энергии как объект картографирования**

В XXI веке мир столкнулся с двумя серьёзными проблемами в области энергетики – это обеспечение надёжности энергоснабжения и сокращение воздействия на окружающую среду, которое сопровождает производство энергии. Экологические проблемы, чрезвычайно нестабильный рынок энергетических ресурсов, все большие потребности в автономном энергоснабжении свидетельствуют в пользу диверсификации источников энергии, в том числе более широкого использования солнечной, ветровой, геотермальной энергии, энергии малых водных потоков и органических отходов.

Россия характеризуется пока невысокими темпами внедрения генерации на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), хотя ещё в 1993 году в разработанной ведущими специалистами в области энергетики под руководством П.П. Безруких «Концепции развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России» было показано, что ресурсы практически всех видов ВИЭ в России в целом и в отдельных ее регионах значительны<sup>1</sup>, в частности, приведены карты ресурсов солнечной, ветровой, геотермальной и других видов возобновляемой энергии по десяти экономическим районам России. В этом документе, утвержденном министром топлива и энергетики РФ Ю.К. Шафраником, были оценены неотложные потребности России в развитии нетрадиционной энергетики. Согласно положениям концепции в последующие годы в стране создавалась нормативно-правовая база отрасли, была принята программа разработки системы государственных стандартов по возобновляемой энергетике, которая позволила в последующие годы разработать и принять ряд государственных стандартов. В

---

<sup>1</sup> «Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России» М.: Минтопэнерго, 1994. – 121 с.

дальнейшем работы по оценке ресурсов возобновляемых источников энергии подтвердили и расширили полученные в 1990-е годы результаты [53, 11].

Серьезный прорыв в сфере российской возобновляемой энергетики произошел в 2007 году, когда были приняты решения о поддержке развития отрасли на государственном уровне. В течение ряда лет разрабатывались механизмы этой поддержки. В результате, в соответствии с постановлением Правительства РФ №449 от 28 мая 2013 г., была принята следующая схема стимулирования использования ВИЭ: окупаемость инвестиционных проектов на возобновляемых источниках энергии обеспечивается путем продажи мощности на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) с заключением договора поставки мощности (ДПМ). Договор поставки мощности заключается на срок 15 лет. В результате государство обязывает потребителей приобретать мощность ВИЭ по законодательно установленной цене, а, поскольку доля ВИЭ в энергобалансе РФ незначительна, дополнительная нагрузка на потребителя является пока практически неощутимой. В настоящее время через указанный механизм государством стимулируются следующие направления ВЭ: фотоэлектрические и ветровые сетевые электростанции, переработка органических отходов производства и потребления с получением электрической и тепловой энергии. К 2024 году суммарная установленная мощность энергоустановок на ВИЭ должна достичь 5 ГВт, что обеспечит порядка 1% производства электрической энергии.

В последние несколько лет растет заинтересованность отдельных российских регионов, компаний и частных лиц, особенно тех, которые полностью или частично находятся в зоне децентрализованного энергоснабжения, к проектам возобновляемой энергетики в связи с необходимостью иметь стабильное и приемлемое по ценам энергообеспечение. Этому способствует специфика энергоснабжения территории Российской Федерации, в которой лишь порядка 1/3 территории покрыта централизованными энергосетями [94, 11 – раздел «Энергоснабжение»]. На остальной территории страны

производство энергии обеспечивается либо локальными энергосистемами, преимущественно на местном или привозном топливе, или с помощью автономных энергоустановок. В последние годы наряду с сооружением сетевых солнечных электростанций в России был реализован ряд проектов по созданию автономных энергоустановок в изолированных энергосистемах: СЭС «Батагай» (Якутия, мощность 1 МВт, ввод в эксплуатацию – 2015), СЭС «Менза» (Забайкальский край, 120 кВт, 2017 г.), а также большое количество менее мощных (до 100 кВт) солнечных электростанций в селах Республики Саха (Якутия), Алтайском крае, Забайкалье и других регионах страны. В отличие от сетевых солнечных электростанций такие энергоустановки являются гибридными системами, объединяющими в своем составе дизель-генераторы, фотоэлектрические установки и накопители электрической энергии.

Развитие возобновляемой энергетики в России требует решения не только технических задач, принятия законодательных актов, обеспечения государственной финансовой поддержки проектов, но и серьезной проработки вопросов, связанных с оценками и анализом территориального распределения ресурсов различных видов ВИЭ, потребностей и возможностей использования возобновляемых энергетических источников в заданном регионе. В настоящее время накоплены обширные массивы исходных данных, обеспечивающие фактологическую основу для таких исследований и расчетов технико-экономических показателей станций на ВИЭ. Важной задачей является верификация этих данных, анализ адекватности методов их получения, аккумуляция и систематизация информации в виде удобных для использования баз данных, а также разработка научно обоснованной методологической основы картографирования ресурсов ВИЭ.

Определим используемый в дальнейшем термин «возобновляемые источники энергии» в соответствии с российским законодательством [95] как «источники энергии, образующиеся на основе постоянно существующих или периодически возникающих

процессов в природе, а также жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества».

Таким образом, к возобновляемым источникам энергии обычно относят:

1. ВИЭ солнечного происхождения:
  - собственно энергия солнечной радиации;
  - гидравлическая энергия рек;
  - энергия ветра;
  - энергия биомассы;
  - энергия океана (энергия волн и морских течений, энергия, извлекаемая из градиентов температуры и др.).
2. ВИЭ несолнечного происхождения:
  - геотермальная энергия;
  - энергия приливов.
3. Энергия органических отходов и источников низкопотенциального тепла.

В научной литературе обычно нет четко обозначенного различия в терминах «ресурсы» и «потенциалы» возобновляемых источников энергии. В данной работе авторы будут обозначать термином «ресурсы» физические носители энергии возобновляемых источников, а именно, падающую солнечную радиацию, движение воздушных масс, органические отходы и т.п. Соответственно характеристиками ресурсов будут выступать их доступные физические объемы в терминах суточных сумм приходящей солнечной радиации, скорости и повторяемости ветра, массы органических отходов. Тогда под термином «потенциалы» в работе будет пониматься энергия, заключенная в этих ресурсах. Для подчеркивания энергетической направленности нами также используется термин «энергетический потенциал». При этом работе дифференцированы понятия «валовый» и «технический» потенциалы ВИЭ. Согласно [85], 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, преобразование которого возможно при современном

уровне развития техники и соблюдении требований по охране окружающей среды.

Объектами картографирования в применении к возобновляемым источникам энергии является достаточно широкий спектр характеристик:

- характеристики ресурсов ВИЭ (комплекс исходных метеорологических и актинометрических данных для оценки ресурсов солнечной и ветровой энергии; физико-химические характеристики геотермальных месторождений; гидрологические данные; статистические данные о количестве образующихся отходов производства и жизнедеятельности человека и пр.);

- валовый, технический и экономический потенциалы различных видов ВИЭ. При этом валовый потенциал, (часто используют также термин «природный потенциал ВИЭ») определяется в соответствии с вышеприведенной формулировкой как приходящая за год солнечная энергия на приемную поверхность заданной ориентации и площади, годовая энергия воздушного потока, проносимая через перпендикулярную потоку поверхность, на заданной высоте, годовая энергия водного потока в створах, энергия образующихся за год органических отходов и др. Технический потенциал определяется с учетом как валового потенциала, так и уровня современных технологий получения потребительских видов энергии от ВИЭ. Экономический потенциал равен той части технического потенциала, которая может быть конкурентно получена от ВИЭ в заданном регионе с учетом текущих цен на энергию от иных источников, в том числе ископаемого топлива;

- технические характеристики установок на ВИЭ (производительность энергетических установок различных типов на заданной территории; инфраструктура, необходимая для сооружения и эксплуатации объектов возобновляемой энергетики);

- экономические характеристики энергии от ВИЭ (себестоимость/приведенная стоимость энергии от традиционных и возобновляемых источников; энергетические балансы регионов; объекты и населенные пункты с автономным энергообеспечением; предприятия, производящие оборудование для отраслей

возобновляемой энергетики; реализованные проекты в области ВЭ и др.);

– социальные аспекты, имеющие влияние на использование энергии от возобновляемых источников (наличие специалистов в области энергетики, занятость населения и потенциальные рабочие места на объектах возобновляемой энергетики; соотношение новых рабочих мест и прогнозируемого объема вырабатываемой энергии и др.);

– природоохранные аспекты (потенциальное снижение вредных выбросов при использовании ВИЭ: снижение загрязнения атмосферного воздуха, почв, грунтовых и поверхностных вод; снижение объемов складированных отходов др.) [58].

Следует отметить, что наиболее сложными для представления в картографическом виде являются экономические и социальные характеристики, а также их комплексный учет совместно с природными и техническими аспектами.

По тематике карт можно выделить однокомпонентные карты (рассматривается только один из источников энергии: солнце, ветер, малые водные потоки, биомасса и т.п.) и многокомпонентные (включающие в себя несколько видов ВИЭ) [58].

Поскольку спектр возобновляемых источников энергии довольно широк и разнообразен по своей природе, в представленной работе для детального рассмотрения проблемы картографирования выбраны ресурсы солнечной, ветровой энергии и энергии биомассы отходов.

## **1.2. Мировой опыт геоинформационного картографирования ресурсов и потенциалов возобновляемых источников энергии**

В настоящее время за рубежом ведется разработка геоинформационных систем (ГИС) и, в целом, активное вовлечение ГИС-технологий в область возобновляемой энергетики. Разработанные и представленные в открытом доступе геоинформационные продукты по возобновляемой энергетике по

охвату территории можно разделить на локальные, региональные, национальные и глобальные.

Пионерами в области создания атласов (в том числе интерактивных) и ГИС национального масштаба закономерно являются те страны, где активное развитие возобновляемой энергетики пришлось на конец XX века – США, Германия, Франция, Дания и другие. Здесь следует детально рассмотреть ГИС-продукты Национальной лабораторией возобновляемой энергии Министерства энергетики США (National Renewable Energy Laboratory (NREL) USA) [153], в которых состав и форма представления данных отражают современные тенденции и запросы ВЭ. Большинство разработанных к настоящему времени ГИС-продуктов в области ВИЭ в той или иной степени имеют аналогичную структуру, и состав карт (электронных или традиционных).

Состав ресурсных интерактивных карт, представленных на сайте тематической ГИС NREL в разделе REAtlas, включает в себя следующие тематические разделы:

**1. Солнечная энергия.** На интерактивных картах показаны среднемесячные и среднегодовые суточные суммы суммарной солнечной радиации, падающей на приемную поверхность южной ориентации, наклоненную под углом, равным широте. Для фотоэлектрических систем с концентраторами и трекерами (системами слежения за Солнцем) приведены карты среднего за год прихода солнечной радиации на нормальную к солнечному лучу поверхность. Ресурсы солнечной энергии представлены в пространственной сетке 0,1 градуса по широте и долготе или около 10 км. Карты снабжены краткими комментариями о методах и источниках получения данных. В частности, при оценке солнечных ресурсов в атласе NREL используются результаты расчетов на основе радиационной модели SUNY [124]. Расчет проводится с часовым разрешением.

В качестве исходных данных для расчета часовых сумм суммарной и прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность используются часовые значения приходящей солнечной радиации, измеренные на геостационарных метеорологических

спутниках, ежедневные данные о снежном покрове и среднемесячные значения содержания водяного пара, следовых газов и аэрозолей в атмосфере. Там, где это возможно, для проверки спутниковых данных привлекаются действующие наземные измерительные станции. Значения часовых сумм *суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности* получают из баланса прямой и рассеянной радиации в суммарной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, путем пересчета прямой радиации на угол и с учетом типа рассеяния, характерного для данной географической точки [34]. Интерактивность карт реализуется путем вывода по клику на любую точку территории массивов данных о среднемесячных значениях суточных сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность и иной информации. При этом пользователю предоставляется доступ к результатам, полученным из различных источников исходных данных (рисунок 1.1).

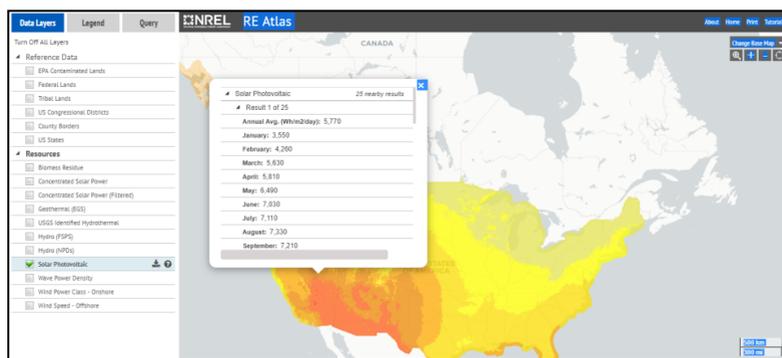


Рис. 1.1. Интерфейс страницы ГИС NREL REAtlas, раздел Solar Photovoltaic (Ресурсы солнечной радиации для использования в фотоэнергетике)

**2. Ветровая энергия.** На интерактивных картах REAtlas NREL представлены классы энергии ветра для сухопутных территорий США с низкой шероховатостью поверхности (травянистые равнины за исключением участков с уклонами более 20%, прибрежные (оффшорные) зоны). Источниками данных являются многолетние метеорологические и аэрологические измерения. Пространственное разрешение сетки составляет 1/4 градуса широты и 1/3 градуса

долготы. Каждой ячейке сетки присвоен класс энергии ветра в диапазоне от 1 до 6, причем 6 – для самых высоких потенциалов энергии ветра. На основе имеющихся данных были получены 12 региональных оценок ветровых ресурсов, которые затем обеспечили оценку ветровых ресурсов на национальном уровне. В комментариях указаны оценки общего валового потенциала энергии ветра территории страны в терминах мощности: более 8000 ГВт на высоте 50 м, причем средняя территориальная плотность валового потенциала составляет 5 МВт/км<sup>2</sup>. Потенциал прибрежных акваторий оценивается в 2200 ГВт для высоты 90 м. Как и для интерактивных карт солнечной энергии, для каждой ячейки сетки по клику предоставляются данные о классе ветра из различных источников данных.

3. **Энергия биомассы.** Биоэнергетические ресурсы и валовый потенциал оценивались на основе статистических данных об органических отходах в предположении, что эффективность преобразования энергии биомассы в электрическую энергию составляет от 30 до 35% в зависимости от типов отходов. Интерактивные карты представлены с дифференциацией до городов и районов отдельных штатов, для которых по клику могут быть получены детальные данные об объемах образуемых отходов следующих типов: общий объем биомассы отходов, объемы отходов растениеводства, животноводства, лесного хозяйства, твердых бытовых отходов и т.д. (рисунок 1.2).

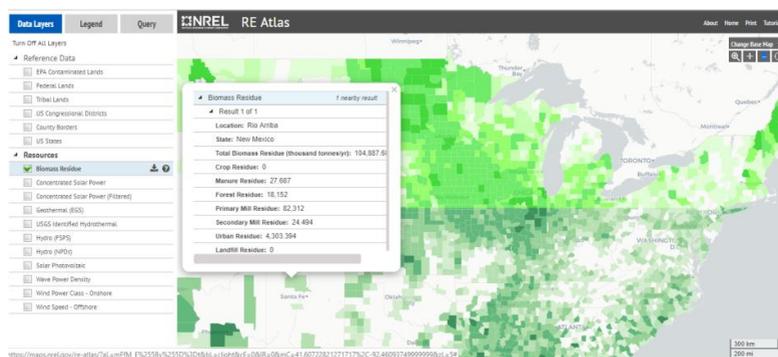


Рис. 1.2. Интерфейс страницы сайта ГИС NREL REAtlas, раздел Biomass Residue (ресурсы органических отходов). На вкладке указаны ресурсы различных видов органических отходов (тыс. т/год).

4. **Геотермальная энергия.** Представленные в этом разделе интерактивные карты отражают классы геотермальных месторождений глубокого залегания с точки зрения условий их использования для получения энергии. Основой классификации являются данные о температурах на глубинах от 3 до 10 км и результаты химического анализа геотермальных флюидов. Рассматриваются только участки, где на глубине 10 км температура геотермального флюида выше 150°C.

5. **Энергия водных потоков (гидроэнергия).** На интерактивных картах сайта показан технический гидроэнергетический потенциал в виде мощности малых ГЭС при их создании на отдельных створах рек (рисунок 1.3). При этом пользователю предоставлена возможность получить оценки этой мощности по различным источникам. Оценки технического гидроэнергетического потенциала приведены также для имеющихся плотин и створов рек, где мощность ГЭС (при их сооружении) составит более 1 МВт. Потенциал представлен в виде интерактивной карты с указанием названия плотины, реки, рассчитанной мощности ГЭС и производительности ее в каждый месяц года. Расчеты мощности и выработанной энергии гидроэлектростанций основаны на не прямых измерениях потока и напора, и результаты не могут быть применены для технического проектирования.

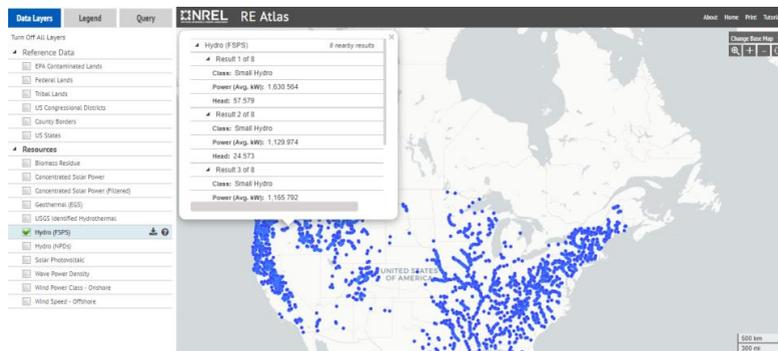


Рис. 1.3. Интерфейс страницы сайта ГИС NREL REAtlas, раздел Hydro (ресурсы гидроэнергии). На вкладке указаны вид гидроэлектростанции (малые ГЭС) и потенциальная мощность (кВт)

Интерактивные карты ресурсов в REAtlas NREL дополнены картами, отражающими расположение:

- нарушенных земель;
- земель федеральной собственности;
- земель, принадлежащих или занимаемых малыми народно-стями;
- границ штатов, округов и т.д.

Растровые карты, созданные NREL US и представленные в открытом доступе [153], дифференцированы по видам ресурсов возобновляемой энергетики с дальнейшей более глубокой детализацией. Например, показаны ресурсы различных видов органических отходов сельского хозяйства (рисунок 1.4), выход метана из свалок при анаэробном сбраживании твердых коммунальных отходов (рисунок 1.5) и др.

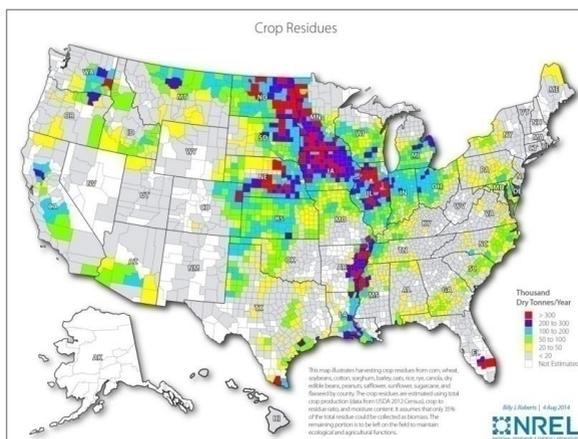


Рис. 1.4. Объемы ежегодно образующейся биомассы отходов растениеводства на территории США [153]

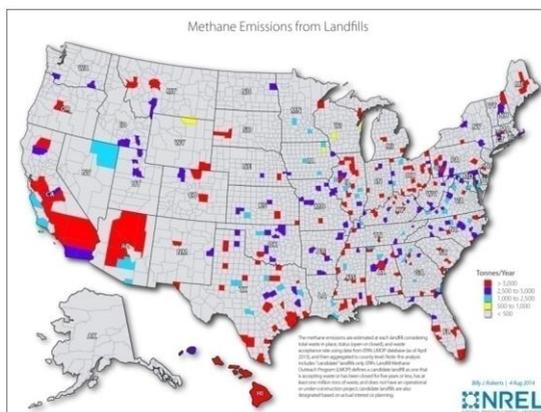


Рис. 1.5. Ежегодная эмиссия биогаза от свалок на территории США [153]

Карты, тематически связанные с ветровой энергетикой, отражают в первую очередь среднегодовые *скорости ветра* на различных высотах (от 30 до 100 м) в соответствии с размерами современных ветроустановок (Рисунок 1.6). Представлена также *плотность энергии ветрового потока* ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) – средняя годовая мощность воздушной струи с площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ . Эта величина непосредственно определяет валовый потенциал в заданной географической точке и на заданной высоте. Ряд карт иллюстрируют производные характеристики, используемые в ветроэнергетике для анализа территории. Например, *площадь территории*, на которой коэффициент использования установленной мощности ВЭУ ( $K_{\text{иум}}$ ) выше или равен 35% (Рисунок 1.7).

Карты ресурсов и потенциалов ветровой энергии для территории США (раздел Geospatial Data Science\Maps сайта NREL) характеризуются различной пространственной локализацией исходных данных (высота над уровнем Земли, оффшорные зоны – сухопутные территории), различным разрешением пространственной сетки (10 км, 200 м и т.д.), временным периодом (средние годовые значения, средние месячные значения). Таким образом, они дают достаточно полную картину распределения ветровых ресурсов и потенциалов. В картографическом виде представлены также территории, разрешенные для строительства ветроэлектростанций (ВЭС).

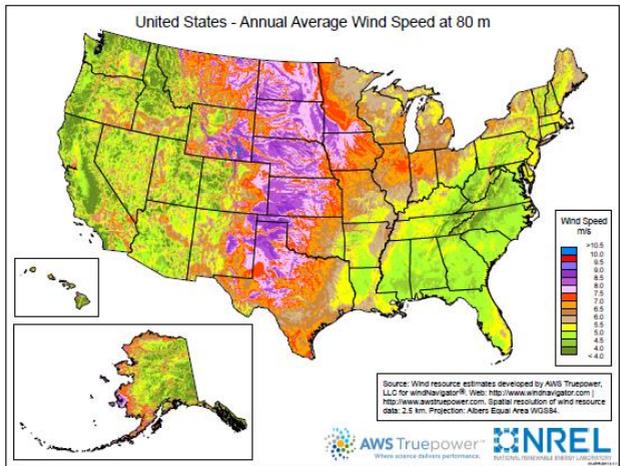


Рис. 1.6. Средние годовые скорости ветра на высоте 80 м [153]

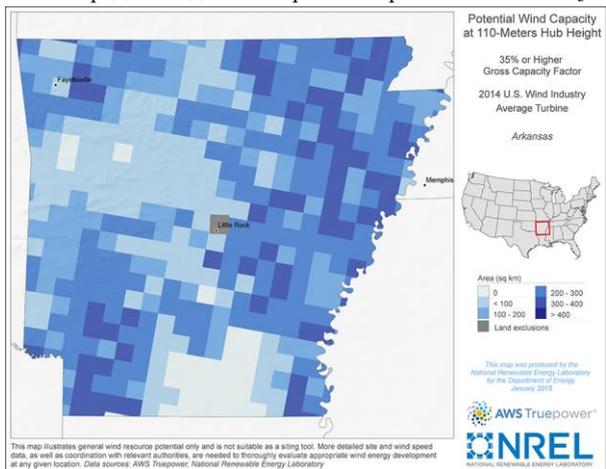


Рис. 1.7. Площадь территории, на которой  $K_{нум}$  ветроэнергостановок более 35%. Карта составлена на основе данных о ветровых ресурсах в пространственной сетке с разрешением 200 м. Оценки  $K_{нум}$  были проведены для ветровой турбины высотой 110 м, типовой по своим техническим характеристикам по состоянию на 2014 г. [153]

Карты ГИС REAtlas сопровождаются доступными для скачивания массивами исходных данных о ресурсах возобновляемой энергетики, а также дополнительными программными инструментами для более

детальной визуализации и анализа этих данных. В результате помимо интерактивного атласа ресурсов ВИЭ для всей территории США (REAtlas), в NREL был разработан и представлен в открытом доступе геоинформационный инструментарий, позволяющий визуализировать детальные данные по следующим направлениям возобновляемой энергетики [153]:

- энергия биомассы (приложения «BioFuels Atlas», «BioPower Atlas»);
- геотермальная энергия (приложение «Geothermal Prospector»);
- энергия океана (приложение «Marine and Hydrokinetic Atlas»);
- солнечная энергия (приложения «Federal Energy Management Program Screening Map», «National Solar Radiation Database Data Viewer», «The Open PV Project», «PVWatts», «Solar for All»);
- ветровая энергия (приложение «Wind Prospector»);
- данные о ресурсах ВИЭ для территорий зарубежных стран (приложение «Renewable Energy Data Explorer»).

Помимо характеристик ресурсов и энергетических потенциалов, ГИС NREL содержит также тематические слои по инфраструктуре возобновляемой энергетики США, а именно: установленной мощности объектов, энергетическому потенциалу прибрежных акваторий, образовательным организациям и программам в области возобновляемой энергетики, объектам на ВИЭ, установленным на школьных и университетских территориях и многое другое. Следует отметить, что карты представлены не только в национальном масштабе, но и детализированы до уровня отдельных территорий (штатов). Так, в разделе карт ресурсов солнечной энергии по клику на территорию штата вызывается карта прямой радиации на нормальную к лучу поверхность или суммарной радиации на горизонтальную поверхность для этой территории (Рисунок 1.8). Таким образом, национальный геоинформационный ресурс носит мультимасштабный характер.

Аналогичные, глобальные по охвату, но с детализацией информацией по отдельным регионам, геоинформационные ресурсы в настоящее время достаточно широко представлены – как в открытом доступе, так и в виде коммерческих проектов. Целый ряд ГИС демонстрирует не только данные и карты о ресурсах ВИЭ, но и содержат простейшие калькуляторы, которые позволяют

пользователю получить приблизительные оценки производительности солнечных и ветровых установок. Так, на сайте партнерства ESMAP [157] под эгидой Всемирного банка (World Bank Group) размещены в виде интерактивных ресурсов глобальный ветровой и солнечный атласы с разрешением 10x10 км. Атласы представляют для любой точки мира (ячейки сетки) скорость ветра, удельную плотность энергии ветра ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) для высот 50, 100 и 200 м, компоненты падающей солнечной энергии на горизонтальную и наклонную поверхность, а также позволяют провести оценки производительности типового фотоэлектрического модуля мощностью 1 кВт.

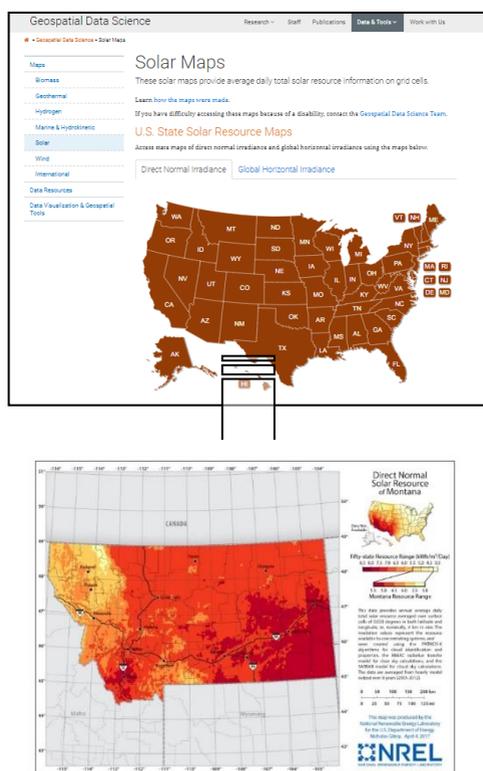


Рис. 1.8. Интерфейс раздела Solar Maps ГИС NREL [153] (вверху) и растровая карта прямой солнечной радиации ( $\text{кВтч}/\text{м}^2/\text{день}$ ) для штата Монтана (внизу)

В 2013 году Международным агентством по возобновляемой энергии (International Renewable Energy Agency, IRENA) был начат проект по созданию Глобального Атласа ресурсов ВИЭ [151]. Одной из главных задач проекта является создание на основе Google Maps региональных интерактивных карт ресурсных характеристик ветровой, солнечной, геотермальной, приливной энергии, энергии биомассы с учетом ограничивающих их использование факторов. При этом пространственная сетка данных достигает для некоторых регионов 100 м (по ветровой энергии). Представлены инфраструктурные характеристики территорий (наличие объектов возобновляемой энергетики, границы регионов, метеорологические станции, ведущие измерения значимых характеристик, электрические сети, электрогенерирующие станции, подстанции, особо охраняемые территории). По клику на перечень картографических слоев открываются краткие комментарии о пространственном разрешении, источниках данных и связанных ресурсах, а по клику на географическую точку, пользователь получает количественную величину ресурса для выбранной точки (Рисунок 1.9). Для отображения инфраструктурных характеристик, оказывающих влияние на выбор площадки для использования ресурсов ВИЭ, в Global Atlas IRENA используются картографические слои OpenStreetMap (2016).

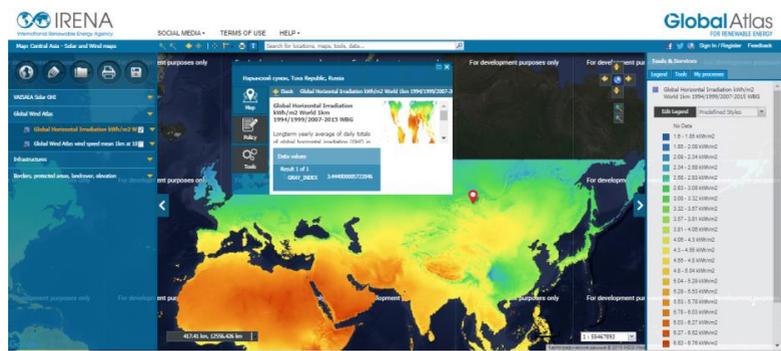


Рис. 1.9. Скрин-шот фрагмента Global Atlas IRENA. Суммарная солнечная радиация ( $\text{kВтч/м}^2$ ), охват территории – глобальный, разрешение сетки 1 км. Слева – перечень картографических слоев, справа – легенда [151]

Ряд регионов представлен в Global Atlas IRENA с *большой* детализацией. Так, для региона Западной Африки дано картографическое представление прямой солнечной радиации на сетке с разрешением 2 км (осредненные за 10 лет результаты численного прогноза погоды для региона Западной Африки), скорость ветра, а также особо охраняемые территории и электрические сети (Рисунок 1.10).

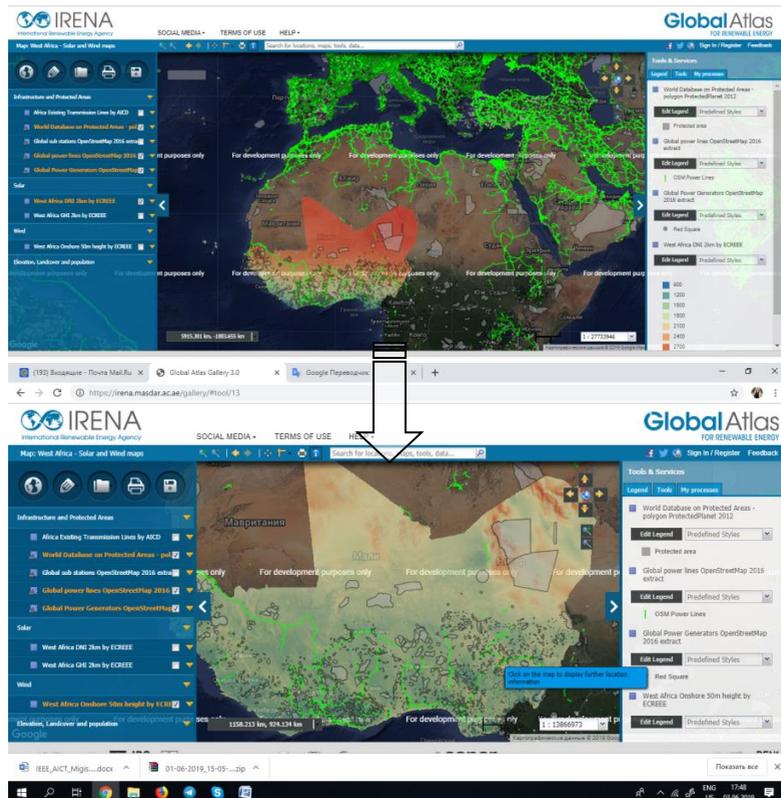


Рис. 1.10. Скрин-шот фрагмента Global Atlas IRENA.

Регион западной Африки. Распределение скорости ветра на высоте 50 м с разрешением 10 км по данным ЗТег [154], особо охраняемые территории и электрические сети [151]

Таким образом, если несколько лет назад можно было говорить отдельно о глобальных и национальных или

региональных ГИС, то в настоящее время крупнейшие ГИС глобального уровня все чаще включают в себя детальные интерактивные карты для отдельных регионов с большим пространственным разрешением.

В то же время отдельные страны и регионы активно разрабатывают и поддерживают собственные национальные ГИС в области возобновляемых источников энергии. Большинство таких продуктов ориентированы в первую очередь на оценку ресурсов ВИЭ. Во многих проектах картографирование ограничивается представлением информации о действующих объектах возобновляемой энергетики и осредненными данными наземных наблюдений по характеристикам ресурсов ВИЭ (падающая солнечная радиация, скорость ветра, расходы в створах рек и др.). Иногда детальность отображения информации доходит до отдельных строений, что позволяет оценить технико-экономические показатели небольших (автономных или сетевых) ветровых или солнечных энергоустановок. Такая подробность обусловлена ориентацией таких продуктов на широкое публичное использование (коммерческое и свободное). Часто эти продукты можно скорее отнести не к картографическим произведениям, а к калькуляторам, использующим геопривязанные данные о ресурсах ВИЭ [163].

В последние годы все больше ГИС помимо ресурсной составляющей дополняются данными о природных, экологических, инфраструктурных и экономических характеристиках территории, которые зачастую являются решающими факторами при принятии решений о строительстве генерирующих объектов на ВИЭ.

Так в Государственном объединении научных и прикладных исследований Австралии (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) создан программный продукт WindScape, позволяющий создавать карты ветрового валового потенциала регионального масштаба на основе наземных и спутниковых измерений средних скоростей ветра. В качестве фактора, который следует учитывать при размещении ветростанций (ВЭС) предложено учитывать растительный покров (в частности, лесные территории) и особо охраняемые природные территории, на

которых строительство запрещено на законодательном уровне [106]. Растительный покров отображается на картах в качестве маски.

В ряде исследований и ГИС-проектов особое внимание уделяется учету критериев устойчивого развития территорий. Так в США разработано геоинформационное обеспечение для проекта EPA's RE-Powering America's Land Initiative (Потенциал чистой и возобновляемой энергии на загрязненных территориях) [112]. Здесь в картографическом виде реализована идея использовать для размещения ветростанций, солнечных электростанций и биоэнергетических объектов территории, оставшиеся после разработки полезных ископаемых, а также иные площадки, образовавшиеся в результате промышленной и сельскохозяйственной деятельности человека и неблагоприятные с экологической точки зрения. Факторами, обеспечивающими привлекательность таких территорий для целей ВЭ, являются: наличие линий электропередач, инфраструктуры, дорожной сети, что может существенно упростить и удешевить строительство. Таким образом, предлагается новый, экономически привлекательный способ использования антропогенных бэдлэндов, т.к. нарушенные земли обычно малоперспективны с точки зрения инвестирования ввиду больших затрат на их очистку и рекультивацию.

В ходе реализации указанного проекта была разработана методология картографирования ресурсов ВИЭ на загрязненных территориях, основанная на оценке средних скоростей ветра, приходящей солнечной радиации, объема биомассы; расчете площади проектируемых объектов, оценке удаленности объекта от линий электропередач и транспортных путей. В результате информационно обеспечивается этап проектирования объектов «чистой» энергетики на заведомо загрязненных территориях.

Web-ресурс проекта был создан с использованием инструмента RE-Powering Mapper. Критерии отбора перспективных площадок были определены в сотрудничестве с Национальной лабораторией возобновляемой энергии Министерства энергетики США (NREL USA). К настоящему времени проанализированы 130 000 площадок на территории 17 штатов (Калифорния, Колорадо, Коннектикут,

Флорида, Гавайи, Иллинойс, Мэриленд, Массачусетс, Миннесота, Миссури, Нью-Джерси, Нью-Йорк, Орегон, Пенсильвания, Техас, Вирджиния и Западная Вирджиния) с последующим расширением и обновлением данных (Рисунок 1.11).

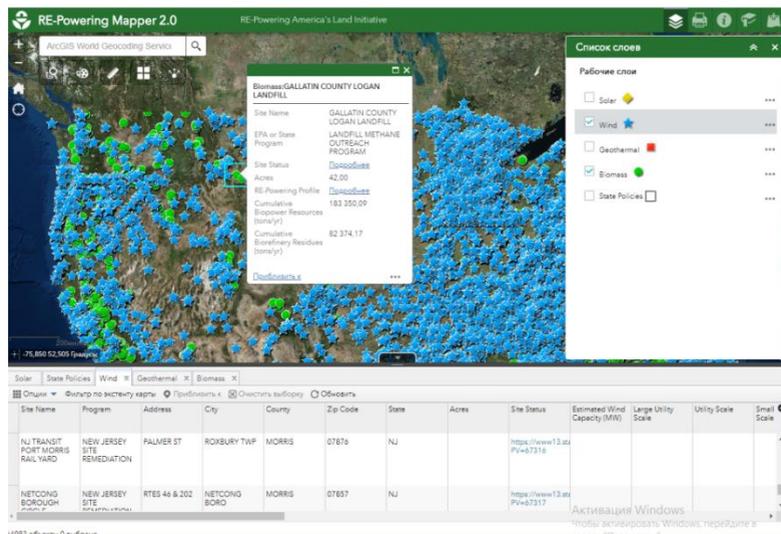


Рис. 1.11. Скрин-шот фрагмента онлайн-веб-приложения проекта ЕРА. Интерактивная карта и база данных, отражающие варианты использования загрязненных земель, свалок и шахт на территории США для размещения ветровых и биоэнергетических станций (август 2018 г.)

Следует отметить, что ГИС-проекты в области возобновляемых источников энергии с глобальным охватом обычно имеют более узкую специализацию по сравнению с национальными и региональными, что обосновано нелегко решаемыми задачами поиска и обработки детальной информации и трудностями учета национальной специфики использования ВИЭ на глобальном уровне. Геоинформационные системы и проекты (в том числе веб-ГИС) национального и регионального масштаба имеют более широкий спектр отображаемых характеристик ВИЭ, с одной стороны. С другой, на национальном и региональном уровне разрабатываются различные узкоспециализированные ГИС и Атласы. В качестве типичного примера можно привести

ThermoGIS – общедоступную веб-ГИС, основной целью которой является оказание информационной (в том числе, картографической) поддержки компаниям и правительству Нидерландов в развитии геотермальной энергетики [166]. ThermoGIS предоставляет помимо карт характеристик геотермальных месторождений, карты глубины, толщины, пористости и проницаемости многих потенциальных водоносных горизонтов в Нидерландах. ГИС снабжена on-line калькулятором, с помощью которого в окне просмотра карт при введении ключевых технических характеристик можно выполнить расчет производительности тепловой/электрической энергии геотермальной установкой или определить наиболее оптимальное местоположение для размещения станции. ГИС ежегодно обновляется, дополняется результатами бурения новых скважин. Поскольку информационной основой карт являются геологические данные регионального масштаба и их интерполяции, применимость картографического материала и получаемых с помощью встроенного калькулятора оценок является ограниченной.

Методы и результаты геоинформационного картографирования ВИЭ можно рассматривать не только на примере прикладных ГИС и электронных атласов. Тематика активно обсуждается и представлена в фундаментальных научных исследованиях и публикациях. Так, разработанный в Технологическом университете Делфта метод картографирования энергетического потенциала (Energy Potential Mapping method, EPM) позволяет оценивать возможности повышения энергоэффективности на муниципальном и региональном уровне, в том числе при планировании городской среды. Он достаточно сложен в реализации и учитывает технические и социально-политические ограничения, но не учитывает воздействие энергообъектов на окружающую среду [108]. Метод позволяет оценить и визуализировать местные природные условия для использования энергетического природного (валового) потенциала при выработке тепловой, электрической энергии и холода с максимальной эффективностью. Графическое представление метода EPM показано на рисунке 1.12.

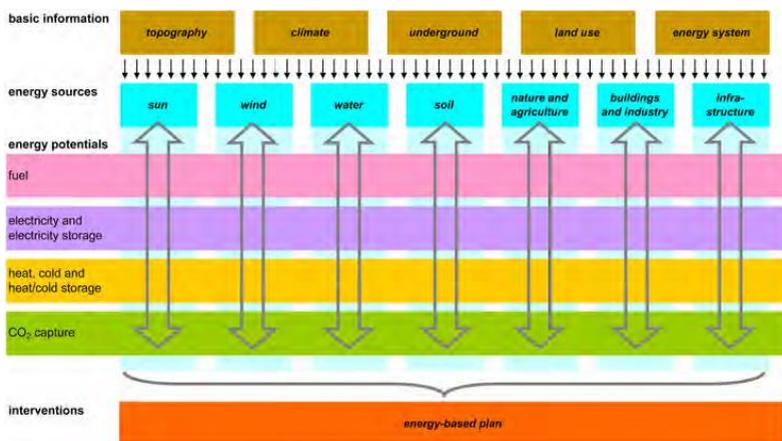


Рис. 1.12. Схема реализации метода ЕРМ при планировании использования местных энергетических ресурсов и иных факторов для получения тепловой, электрической энергии и холода [108]

Видно, что метод является комплексным с точки зрения источников энергии (учитываются ресурсы солнечной, ветровой, гидроэнергии, геотермальная энергия, энергия биомассы, в том числе органических отходов производства и потребления). В качестве факторов использования указанных источников энергии рассматриваются топография местности, климат, геоморфологические условия, землепользование и энергетическое хозяйство (электрические и тепловые станции и сети). При реализации метода оцениваются не только потенциальные объемы производства энергии и топлива, но и возможности аккумулирования тепловой, электрической энергии и холода. Проводится также оценка выбросов  $\text{CO}_2$  при различных сценариях использования энергетических ресурсов. Результатом реализации метода является комплексный план энергообеспечения городской территории с преимущественным использованием местных энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых. Картографический метод является удобным инструментом для отображения полученных результатов и их анализа.

Одним из первых проектов, реализованных методом ЕРМ, была разработка плана устойчивого энергоснабжения провинции

Гронинген (Нидерланды) (Рисунок 1.13), в котором были учтены возобновляемые и не возобновляемые энергетические ресурсы.

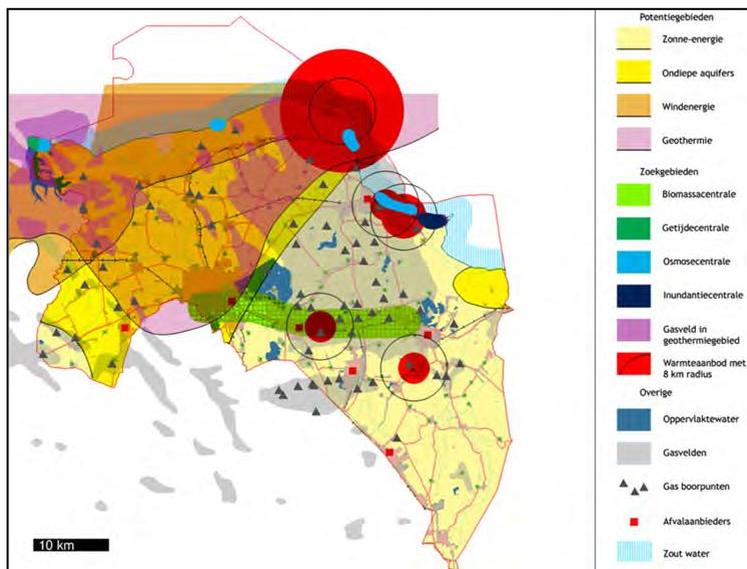


Рис. 1.13. Комплексная карта местных энергетических ресурсов на территории провинции Гронинген [109]

Для более наглядной визуализации потенциалов и энергетических балансов на локальном уровне (до отдельных зданий) используются разнообразные методы картографирования. Так, на рисунке 1.14 показана трехмерная карта Нидерландов, которая отображает баланс источников и потребностей в тепловой энергии в виде «возвышений» или «провалов» территорий над некоторым нулевым уровнем. При этом использовались оценки территориальной плотности ресурсов тепловой энергии (Джоуль/га). Технический потенциал точечных источников тепловой энергии (сбросное тепло от электростанций, мусоросжигательных заводов, супермаркетов и других объектов) и нагрузка точечных потребителей этой энергии отображались в виде столбцов с указанием доступной/потребляемой мощности.

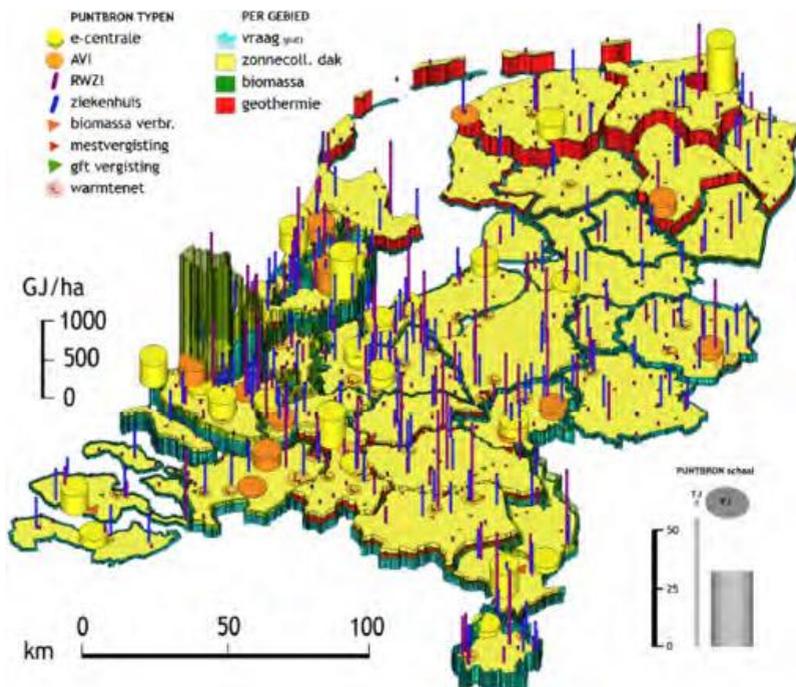


Рис. 1.14. Тепловая карта Нидерландов, отображающая спрос на тепловую энергию и доступные ресурсы (природные и антропогенные) [104]

С использованием метода ЕРМ были выполнены карты энергетических балансов в масштабах отдельных муниципалитетов и районов городов (портовая территория Роттердама, небольшой населенный пункт Эммен и др.) (Рисунок 1.15). Как видно, здесь также использовалось трехмерное картографирование, отображающее спрос на тепловую энергию в пределах отдельных объектов-потребителей (прозрачные «емкости» на карте) и ресурсы тепловой энергии, имеющиеся в пределах этих объектов («заполнение» прозрачных «емкостей»). При этом цветовая гамма была использована для обозначения вида источника тепловой энергии (биомасса, геотермальное тепло, солнечная энергия). На карте представлены также точечные источники энергии и тепловые сети. Все энергетические характеристики представлены в единых величинах (ГДж/га). Логичным шагом развития метода стала привязка к каждому единичному объекту-потребителю трехмерных

диаграмм, отображающих изменение спроса и ресурса в реальном времени в соответствии с изменением потребления тепловой энергии в различные сезоны года, режимом работы объектов-источников энергии и других процессов. Таким образом, использованный метод и созданные карты позволяют провести детальный анализ и планирование энергоснабжения территорий регионального и локального масштаба.

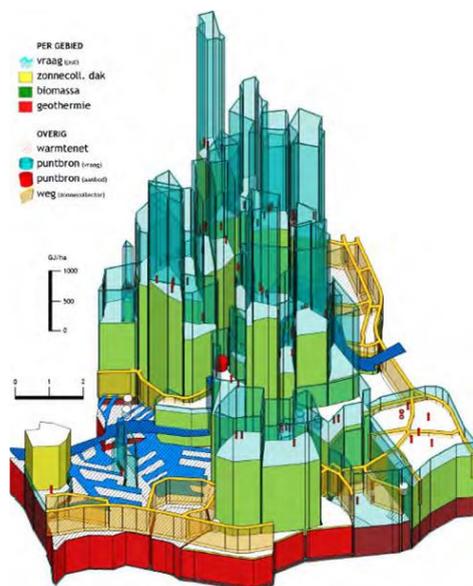


Рис. 1.15. Подробная тепловая карта центрального района города Роттердам: пустотелые «емкости» указывают на потребность в тепле, заполнение «емкостей» – ресурсы тепловой энергии (природные и антропогенные). Цветом слоев обозначены типы ресурсов энергии (биомасса, геотермальное тепло, солнечная энергия) [104]

Помимо карт и атласов, отражающих ресурсную базу возобновляемой энергетики, интересным и практически значимым направлением геоинформационного картографирования (обычно регионального масштаба) является исследование территории ГИС-методами для принятия решения о строительстве объекта возобновляемой энергетики или объекта смежных областей. Так, целью исследования [102] и других аналогичных работ являлась создание научной и методической основы для поддержки принятия решений относительно выбора пло-

щадок для ветроэнергетических установок (ВЭУ) с использованием ГИС-инструментов. В [102] на базе исходного ограниченного набора данных методами экстраполяции создана модель регионального распределения ресурсов ветровой энергии. На основе технических характеристик был сделан прогноз распределения производительности ВЭУ по территории. Экологические ограничения были использованы для определения территорий, доступных для размещения ветровых станций. Расчеты удельных затрат на производство энергии от ВЭУ с учетом инфраструктуры региона на заключительной стадии анализа позволили определить оптимальные места размещения ветровых станций.

Значительный объем исследований посвящен комплексному анализу ресурсов ВИЭ заданной территории с целью оптимизации состава и мощности гибридных установок для обеспечения автономных и сетевых потребителей энергии [122].

В [117] и других работах большое внимание уделяется анализу использования генерирующих объектов на ВИЭ малой и средней мощности. Такой подход, как предполагается, может обеспечить Великобритании и другим странам Евросоюза достижение целей внедрения ВЭ к 2020 году и изменить подходы к использованию энергии посредством активного участия групп населения (поселения, общин и др.) в производстве-потреблении энергии. В работе были использованы ГИС-методы для проведения оценки комплексного потенциала нескольких видов ВИЭ на региональном уровне. Как и в большинстве исследований данного направления, ее ядром является пространственный анализ высокого разрешения, ориентированный на локализацию территории с достаточным потенциалом возобновляемой энергии. В методике рассматривается ряд технологий, включая гидроэнергетику, ветроэнергетику, солнечную энергетику и биоэнергетику. Результаты показывают, что для небольших общин выбранного региона имеются достаточные ресурсы ВИЭ, чтобы при некоторых поведенческих сценариях достичь цели самообеспечения энергией. В то же время отмечается необходимость дальнейшей детализации исследований в следующих направлениях:

- определение предпочтительных для сообщества технологий производства энергии и отношений собственности к установкам и станциям;

- оценка взаимозаменяемости (оптимального сочетания) возобновляемых источников энергии в течение сезона, месяца, года;
- учет местных ограничений на использование ВИЭ, например, инфраструктуры и планов развития территории;
- анализ социальных последствий использований ВИЭ в регионе и продуктивности принятых решений для достижения целей низкоуглеродного общества и др.

Следующим шагом исследований в целях оптимизации территориальных схем энергоснабжения с использованием местных ВИЭ является – помимо определения ресурсных характеристик территории, учета графиков нагрузки потребителей, экологических и иных ограничений на строительство объектов энергетики – сравнительный анализ себестоимости энергии от различных (углеводородных и возобновляемых) источников. Разработанная методика анализа территории с целью оптимизации энергоснабжения после апробации может быть предложена для практического использования. В связи с необходимостью учета широкого набора факторов при обосновании мест расположения объектов энергоснабжения на основе местных ВИЭ (в том числе, органических отходов) востребованы методы мультикритериального анализа территории.

Поскольку управление отходами в целом и переработка органических отходов с получением энергии, в частности, являются значимыми проблемами для многих стран мира, значительное число исследований в области возобновляемой энергетики посвящено оптимизации размещения систем переработки органических отходов на заданной территории при наличии распределенных источников отходов. Методы использования ГИС-инструментов для оптимизации территориальных схем переработки органических отходов на региональном уровне являются актуальным направлением исследований [107; 103; 116].

Здесь одним из самых динамично развивающихся направлений является выбор территорий для переработки органических отходов с получением энергии. Так, в работах Европейского института энергетических исследований Технологического института Карлсруэ (Германия, European institute for energy research at the KIT) была



животноводческой фермы; создается векторный слой пространственного распределения отходов животноводства;

1.3. Для оценки пространственного распределения органических отходов от близко расположенных предприятий и с учетом расстояний, в пределах которых транспортировка отходов рентабельна, вводится виртуальная «плотность» образования отходов. Она определялась путем деления ежегодного объема органических отходов от животноводческого предприятия на площадь территории в форме круга с центром в месте расположения этого предприятия и радиусом 10 (40) км. На территориях, где круги от различных предприятий накладывались друг на друга, «плотность» отходов суммировалась (инструмент *FocalStatistic-sum*). В результате были определены районы с максимальной плотностью отходов животноводства как первое приближений наиболее оптимальных территорий для размещения БГС (Рисунок 1.17).

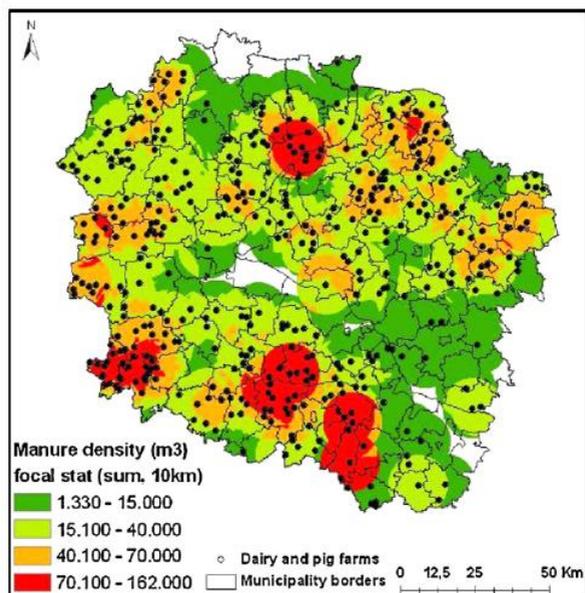


Рис. 1.17. Виртуальная «плотность» образования животноводческих отходов (радиус 10 км) [102]

2. Учет ограничивающих и благоприятных факторов для размещения биогазовых станций.

Ограничивающие факторы – это факторы, которые полностью исключают возможность размещения биогазовых установок на исследуемой территории, а благоприятствующие – те, которые способствуют размещению биогазовых установок. Для самого общего случая в методике были учтены следующие факторы:

*Ограничивающие* – объекты, на территории которых физически невозможно размещение БГС:

- Леса
- Водные объекты
- Водоохранные зоны
- Экологические коридоры
- Природные заповедники
- Зоны строительства и селитебные территории
- Дороги (железные, авто).

Благоприятные – объекты, наличие которых сокращает затраты на сооружение БГС и использование произведенной энергии.

- Электрические сети (магистральные, распределительные, подстанции)
- Газовая сеть.

Помимо перечисленных факторов в работе [102], в которой методика была апробирована для территории Куявско-Поморского воеводства Республики Польша, учитывалась близость к заселенным территориям (во избежание влияния шума и возможных газовых выбросов от БГС) и эстетическая ценность территорий. Для отображения факторов, ограничивающих и благоприятных для строительства биогазовых станций, были построены цифровые карты, которые детально отражали основные типы землепользования (дороги, сельскохозяйственные земли), назначение территории (селитебная, природоохранная) и природные объекты (например, леса, водные акватории, болотные угодья и т.д.). Следует отметить фактор, учет которого специфичен для данного направления исследований. В целях повышения эффективности переработки животноводческих отходов необходимо добавление в сбраживаемый субстрат органики с высоким содержанием углерода, в качестве которой используют солому и иные отходы растениеводства. Поэтому на данном этапе алгоритма с учетом статистических и географически привязанных данных об объемах

образования отходов растениеводства аналогичным п.1.2-1.3 методом оценивалось потенциальное количество пожнивных остатков, соломы и т.п., которые можно рентабельно транспортировать до выбранных площадок БГС. Проводилась оценка баланса требуемых и доступных (в пределах 5, 10, 20 и т.д. км) растениеводческих отходов. Таким образом, количество доступных ресурсов отходов растениеводства являлось ограничивающим фактором при выборе площадки для БГС.

При составлении карт факторов строительства станций пространственно-привязанные векторные слои обрабатывались с использованием функций *Extract*, *Overlay*, *Proximity* из набора инструментов Toolbox ArcGIS. Наложение указанных слоев позволило определить предпочтительные территории для БГС.

Аналогичные подходы, основанные на многофакторном пространственном анализе физико-географических и социально-экономических особенностей территории, используются в настоящее время в исследовательских работах и практическом применении для смежных областей возобновляемой энергетики, например, для определения площадок складирования твердых бытовых отходов. Так, в [133] была предложена методика выбора оптимальных площадок захоронения бытовых отходов для Пондичери (союзной территории в составе Индии). Алгоритм анализа во многом сходен с упомянутым выше подходом [102] и включает:

- оценку объемов образования отходов с геопривязкой к местам их образования,

- выбор факторов – запрещающих и благоприятных для складирования отходов. Ряд факторов представляют собой перечень *природных или инфраструктурных объектов*, для которых должны быть соблюдены (или уже законодательно закреплены) буферные зоны, в пределах которых размещение полигонов запрещено:

1. Водные объекты (озера, пруды и реки)
2. Источники водоснабжения
3. Населенные пункты
4. Транспортные пути
5. Ценные сельскохозяйственные угодья

К другой группе факторов относятся те характеристики территории, текущее и будущее (после размещения полигона), состояние которых необходимо учитывать при принятии решения. К таковым относятся:

1. Качество подземных и грунтовых вод и их пространственное распределение;
2. Геологические и геоморфологические особенности исследуемой территории;
3. Инфильтрационные свойства почв – характеристика почв, определяющая скорость поглощения фильтрата, образующегося в результате проникновения атмосферных осадков в толщу полигона твердых бытовых отходов.

Ранжирование критериев выбора площадки для полигонов твердых бытовых отходов по степени значимости в [123] основывалось на следующих принципах:

- для ранжирования использовался метод Delphi (экспертная оценка), предусматривающий опрос специалистов в области охраны окружающей среды, здравоохранения и органов местного самоуправления. По результатам анализа полученных ответов критерии были объединены в 4 категории (критерии землепользования, критерии качества воздуха, гидрологические критерии, ограничивающие параметры) и подкатегории. Каждому критерию путем попарного сравнения придавался вес, на основе чего была разработана матрица иерархии критериев, и для каждого отдельного участка рассматриваемой территории путем сопоставления значимых для нее критериев присваивался индекс пригодности территории для размещения полигона твердых бытовых отходов;
- совместный анализ карт буферных зон и карт, отражающих значения индекса пригодности по всем участкам заданной территории позволяет выбрать наиболее оптимальную площадку для размещения отходов.

Проведенный обзор зарубежных исследований и ГИС-проектов в предметной области выявил, таким образом, что актуальными направлениями в настоящее время являются, как определение ресурсов и потенциалов ВИЭ, так и широкого спектра технико-экономических результатов их использования (потенциальная

производительность энергообъектов на ВИЭ, себестоимость энергии от ВИЭ), воздействия объектов возобновляемой энергетики на окружающую среду. Значительные прогресс наблюдается в разработке методических основ картографирования потенциала ВИЭ, позволяющих анализировать его пространственное распределение при решении стратегических задач регионального масштаба.

### **1.3. Отечественный опыт картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии**

В России вследствие существенно более низкого уровня использования возобновляемых источников в энергетическом комплексе страны исследования в области территориального планирования и оптимизация схем энергоснабжения с учетом ВИЭ не получили столь широкого развития, как за рубежом. Однако в связи с активизацией в последние годы государственной стимулирующей политики в области возобновляемой энергетики происходит активизация такого рода исследований. Фундаментальной работой, продемонстрировавшей огромные ресурсы возобновляемой энергии в стране, явился вышедший в 2007 году «Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям)» под редакцией П.П. Безруких [85]. В справочнике приведены методики и результаты расчетов валового, технического и экономического потенциалов всех видов ВИЭ: солнца, ветра, малой гидроэнергетики, геотермальной энергии, низкопотенциального тепла и энергии биомассы для всех субъектов РФ. Расчёты образования органических отходов как ресурсов биоэнергетики выполнены на основе статистических данных начала 2000-х годов. В сборник вошли карты распределения технического потенциала ВИЭ по федеральным округам РФ, суммарного количества органических отходов агропромышленного комплекса (АПК) и энергии органических отходов городов и АПК (валовый потенциал). Также представлено распределение потенциала производства биогаза и пеллет по федеральным округам РФ. В сборник вошли также карты геотермальных ресурсов на территории России, подготовленные ассоциацией «Геотермальное энергетическое общество». Весь картографический материал отражает интегральные показатели по субъектам РФ.

В целом, в России (и ранее в СССР) были созданы единичные картографические произведения, в той или иной степени соответствующие потребностям возобновляемой энергетики в целом и солнечной и ветровой энергетики в частности. Рассмотрим наиболее значимые из них. На основе многолетних наземных актинометрических и метеорологических измерений Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова были разработаны Атласы ветрового и солнечного климата России [19]. Фактологической основой карт Атласов являлись средние многолетние значения солнечной радиации, рассчитанные по данным актинометрических станций России с начала наблюдений по 1980 год, и в основной своей массе отраженных в Научно-прикладном справочнике по климату [54]. Ориентация на нужды солнечной энергетики проявилась, в частности, в том, что помимо стандартных измеряемых на актинометрических станциях величин (суммарная радиация, приходящая на горизонтальную поверхность; прямая радиация на перпендикулярную (или нормальную) к лучу поверхность, доля рассеянной радиации, альbedo поверхности, радиационный баланс и др.) в атласе были представлены и расчетные величины<sup>2</sup>:

- суммарная радиация, поступающая на следящую за солнцем поверхность,
- то же – на поверхность, наклоненную на оптимальный для каждого месяца угол;
- то же – на поверхность, наклон которой равен широте места.
- прямая радиация, поступающая на горизонтальную поверхность,
- то же – на поверхность, следящую за солнцем.

В детальном пояснении к атласу приведены методики оценки электрической энергии, вырабатываемой фотоэлектропреобразователем, и тепловой энергии, получаемой от плоского коллектора. Результаты расчетов также отражены на картах.

Пример карт, вошедших в Атласы [19], представлен на рис. 15. Видно, что территории со сложным горным рельефом, где достоверность значений невысока, выделены штриховкой. Как сказано

---

<sup>2</sup> На картах Атласа отображены среднемноголетние месячные и годовые суммы суммарной солнечной радиации. Для характеристики межгодовых вариаций приведена карта коэффициента вариации.

в комментариях к Атласам, карты отражают распределение солнечной радиации на равнинной части территории России и в предгорьях (до высоты 800 м над уровнем моря) при средних условиях облачности. Масштаб карт не позволял учитывать местные условия (закрытость горизонта, запыленность атмосферы в крупных городах). И, как видно из карт (рисунок 1.18), на них представлена достаточно генерализованная картина распределения актинометрических характеристик<sup>3</sup> с ярко выраженной широтностью, практически не модулированная региональными особенностями формирования «солнечного» климата. Поскольку в Атласах не предусмотрены и не указаны административные границы, достаточно сложно использовать карты для региональных оценок ресурсов солнечной энергии.

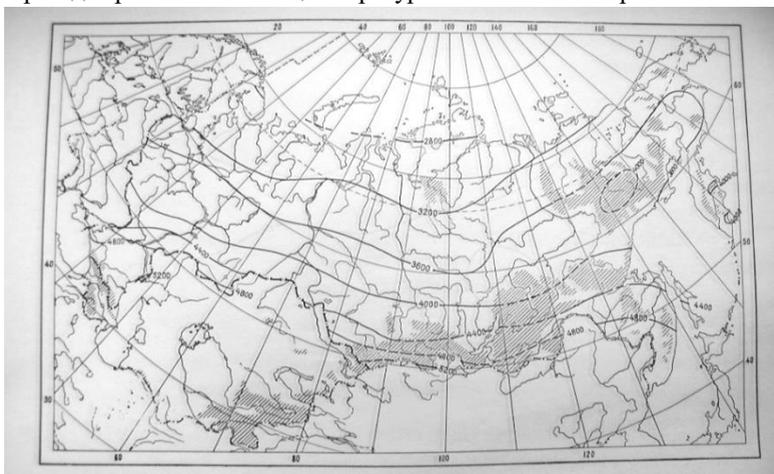


Рис. 1.18. Годовые суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность [19]

Ветровые характеристики, представленные в картах Атласов, позволяют оценивать энергию воздушной струи на высотах метеорологических измерений (10-16 м). Карты отражают средние скорости и повторяемости скоростей ветра (месячные и годовые), повторяемость штилей, а также значения параметров функции Вейбулла, которую традиционно в ветроэнергетике используют для аппроксимации реальной функции распределения скорости ветра. Фактологической

<sup>3</sup> Шаг изолиний в картах удельной суммарной радиации составлял 400 МДж/м<sup>2</sup> для годовых сумм и 40 МДж/м<sup>2</sup> для месячных сумм.

основой для карт являлись средние многолетние результаты наблюдений на метеостанциях, имеющих ряды измерения 20-25 лет [19]. Перечень метеостанций формировался так, чтобы с возможно большей однородностью была покрыта вся территория страны; исключались метеостанции, которые находились в городах, котловинах, непродуваемых долинах горной местности и других точках, не отвечающих характерным местным условиям. Пример карт атласа, отражающих ветровые характеристики, приведен на рисунке 1.19.



Рис. 1.19. Картографическое представление ветровых характеристик в [19]: а – повторяемость скоростей ветра (%); б – среднемесячная скорость ветра (м/с)

Видно, что карты ветровых характеристик в силу выбранного масштаба так же, как и карты солнечных характеристик, отличаются значительной генерализованностью, а, следовательно, дают лишь ограниченную возможность оценивать ресурсы солнечной и ветровой энергии на региональном уровне (например, отдельных субъектов России). Незначительность высот, к которым относятся отображаемые скорости ветра, также существенно снижает ценность представленных карт с точки зрения современной ветроэнергетики, когда типовая высота установок мегаваттного класса достигает 80 и более метров.

В 2000 г. на основе данных наземных метеорологических наблюдений объединенным российско-датским коллективом авторов был подготовлен Атлас ветров России [89]. Это издание содержит достаточно пространное изложение методов оценки ветровых ресурсов, разработанных датским научным центром Risø National Laboratory for Sustainable Energy (Technical University of Denmark), и являющихся в Европе де-факто общепринятым (хотя и не бесспорным) инструментом в ветроэнергетических расчетах. Однако полноценным атласом эту работу назвать нельзя, поскольку она не содержит карт распределения скоростей ветра, или иных ресурсных характеристик. Для каждой из выбранных метеостанций на территории России дано описание местности (рельеф, ландшафт) и количественные параметры (рисунок 1.20), которые позволяют определить энергетические характеристики ветра в месте расположения метеостанции на высоте 10 м, а именно:

- местоположение станции,
- скорость и удельная мощность воздушной струи ( $\text{Вт/м}^2$ ) на различных высотах (10, 30, 50, 100, 200 м),
- повторяемость скорости ветра различных направлений и суммарная повторяемость ветра,
- роза ветров,
- характеристики подстилающей поверхности (коэффициент шероховатости, характерная высота шероховатости и др.).

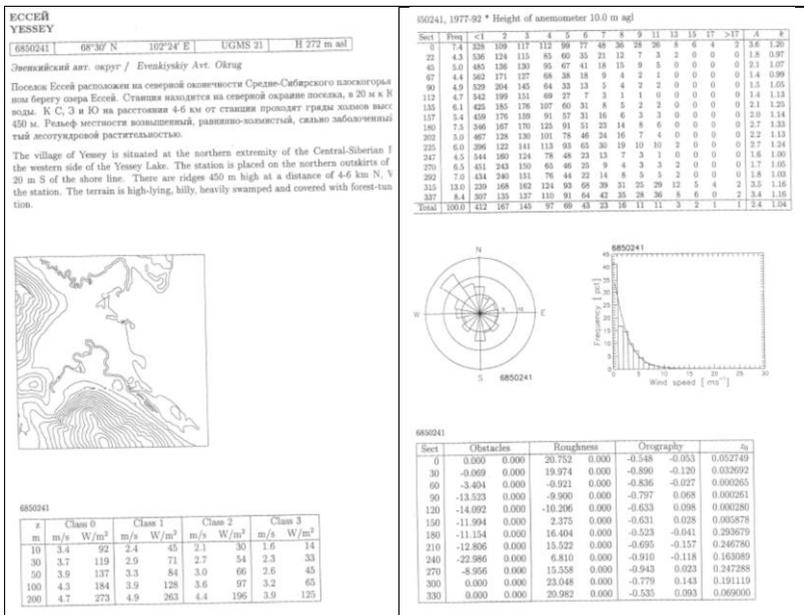
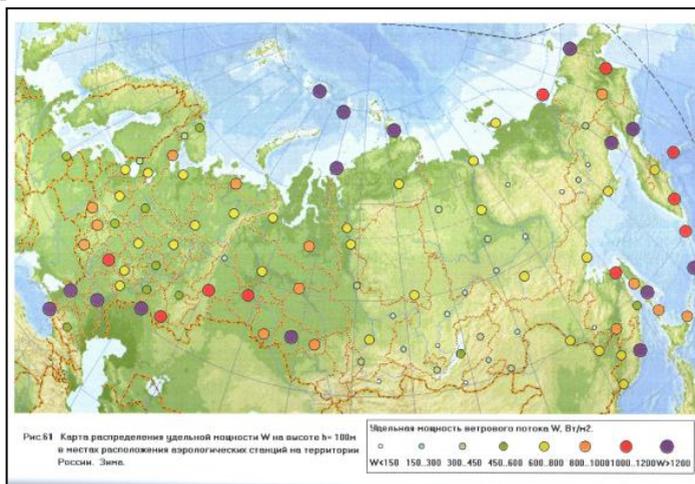


Рис. 1.20. Фрагмент содержательной части Атласов ветров России: характеристики ветрового режима в точках наблюдений (метеостанции) [89]

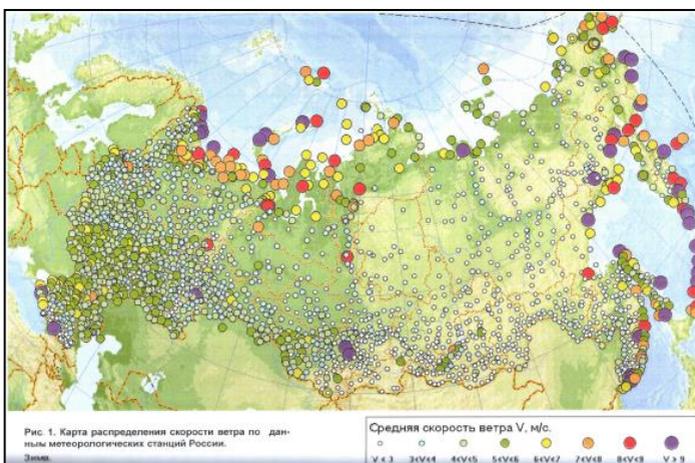
Элементы картографирования ветровых ресурсов на территории России можно найти также в работе [53]. Фактологической основой для составления карт являлись данные аэрологической сети о скоростях ветра на высоте 100 м. Анализ картографического материала, представленного в этом издании (рисунок 1.21), показывает, что он отражает следующие характеристики в дискретных точках<sup>4</sup>: средние скорости за сезон на высотах метеорологических наблюдений; расчетные (по модели авторов) средние скорости за сезон, удельная мощность и удельный импульс ветра на высотах 15, 50, 100 м в местах расположения аэрологических станций, погрешность определения средних скоростей на указанных высотах, розы ветров в точках

<sup>4</sup> Количество точек в соответствии с количеством аэрологических станций, действовавших на территории СССР – порядка 100.

расположения аэрологических станций, там же – вероятность затишья и стоимость энергии, произведенной заданным типом ветряков.



а

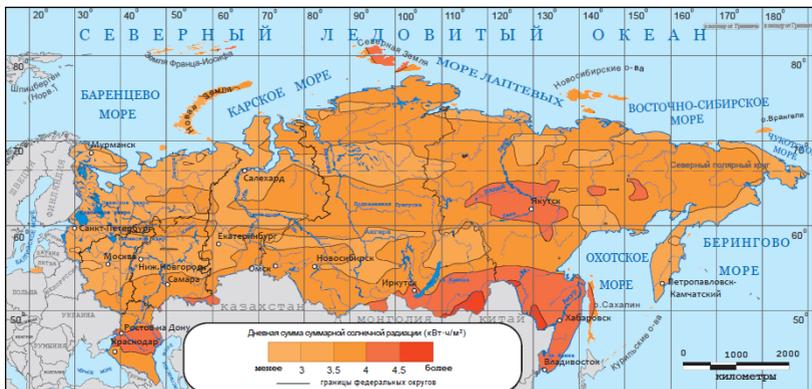


б

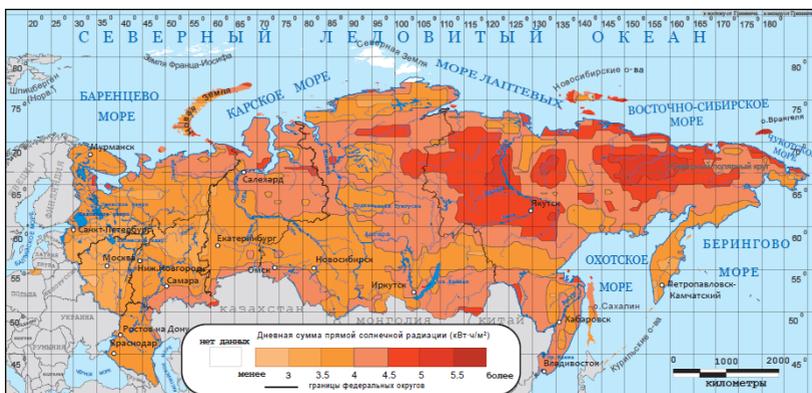
Рис. 1.21. Пример карт, представленных в [53]: а – удельная мощность ветрового потока на высоте 100 м в точках аэрологических наблюдений, б – средняя скорость ветра в точках метеорологических наблюдений.

Как видно, в работе не сделано попыток провести интерполяцию ветровых характеристик между точками. В связи с этим использование карт для оценок ветроэнергетических характеристик территорий, удаленных от метеорологических и аэрологических станций, представляется затруднительным, причем, с неизвестной наперед погрешностью.

Ниже, в разделе, посвященном источникам данных для оценок ветровых и солнечных ресурсов, будут подробно рассмотрены реанализы и тематические базы данных (БД), содержащие информацию, востребованную в ветровой и солнечной энергетике. Одной из таких баз данных является NASA POWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource) [148] – ранее NASA SSE (Surface Meteorology and Solar Energy). БД NASA POWER является чрезвычайно широким по номенклатуре и соответствующим запросам современной солнечной и ветровой энергетике источником данных. В 2010 г. впервые в России эта база данных была использована для картографирования ресурсов солнечной и – частично – ветровой энергии в Атласе ресурсов солнечной энергии на территории России [68]. Карты, представленные в атласе (рисунок 1.22), впервые представили специфические для солнечной энергетике характеристики (суммарная солнечная радиация, приходящая на различным образом ориентированные поверхности при различных периодах осреднения) на очень частой (по сравнению с прежними подходами) регулярной пространственной сетке (1 градус по широте и долготе). Качество исходных данных делало этот картографический материал, с одной стороны, достаточно ценным с точки зрения возможности использовать его для гораздо более подробного отражения характеристик солнечной и ветровой энергии территории. С другой стороны, выбор чрезвычайно неудачной для территории России цилиндрической проекции, и мелкий масштаб карт не позволили дать детальное представление о солнечных и ветровых ресурсах отдельных регионов.



а



б

Рис. 1.22. Примеры карт, представленных в [68]: а - среднегодовая дневная сумма суммарной солнечной радиации, приходящей на наклонную поверхность (угол наклона ( $\varphi-15^\circ$ )); б – среднегодовая дневная сумма прямой солнечной радиации, приходящей на следящую за Солнцем поверхность ( $\varphi$  – широта места)

В 2015 году был опубликован Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России [11]. В Атласе существенно расширен спектр рассматриваемых видов ВИЭ: представлены ресурсы и потенциалы энергии солнца, ветра, малых водных потоков, торфа, энергии биомассы, в том числе сельскохозяйственных отходов, твердых коммунальных отходов (ТКО), осадков сточных вод (ОСВ), отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности. Состав

карт Атласа приведен в таблице 1.1. Помимо карт в Атласе приведены методики расчета и анализ распределения ресурсов и энергетических потенциалов возобновляемых источников энергии на территории РФ. В картографическом виде представлены как характеристики ресурсов (скорость ветра на различных высотах, падающая солнечная энергия на различным образом ориентированные поверхности и т.д.) в пространственной сетке ( $1 \times 1^\circ$ ), так и энергетические потенциалы. Валовые и технические энергетические потенциалы ВИЭ приведены с детализацией до субъектов РФ. При этом ряд крупных субъектов Сибири и Дальнего Востока были разделены на регионы в связи со значительной площадью этих субъектов и существенным различием метеорологических (включая актинометрические) условий в пределах территории. Примеры карт Атласа представлены на рисунке 1.23.

Таблица 1.1.  
Содержание Атласа ресурсов возобновляемой энергии  
на территории России [11]

№ карты	Наименование
	<b>1. Солнечная энергия</b>
1.1.-1.17	Суммарная солнечная радиация (различным образом ориентированные поверхности; средние за год, теплые полгода, лето)
1.18.-1.21	Прямая солнечная радиация (следающая за солнцем поверхность; год, теплые/холодные полгода, лето)
	<b>2. Ветровая энергия</b>
2.1-2.5	Среднегодовая скорость ветра (H = 10, 30, 50, 100, 120 м)
2.6-2.9	Среднегодовая плотность энергии ветрового потока (H = 30, 50, 100, 120 м)
2.10-2.13	Годовой удельный валовый потенциал энергии ветра (H = 30, 50, 100, 120 м)
2.14-2.17	Годовой удельный технический потенциал энергии ветра (H = 30, 50, 100, 120 м)
2.18-2.21	Общая продолжительность энергетических затиший в течение года (H = 30, 50, 100, 120 м)
2.22-2.29	Годовой валовый/технический потенциал энергии ветра субъекта (H = 30, 50, 100, 120 м)

	<b>3. Энергия органических отходов (биоэнергия)</b>
3.1-3.5	Валовый энергетический потенциал отходов растениеводства/ животноводства /ТБО / ОСВ/ ЛПК
3.6-3.15	Технический энергетический потенциал отходов растениеводства/ животноводства /ТБО / ОСВ/ ЛПК (производство электрической/тепловой энергии)
	<b>4. Энергия малых водных потоков</b>
4.1, 4.3	Энергия малых рек, валовый/технический потенциал
4.2, 4.4	Удельная плотность энергии малых рек (удельный валовый/технический потенциал)
	<b>5. Ресурсы торфа</b>
5.1	Балансовые запасы торфа по субъектам РФ
5.2	Балансовые запасы торфа по субъектам РФ
5.3-5.4	Прогнозные ресурсы по субъектам РФ, месторождения более 10 га /до 10 га
5.6	Валовый потенциал торфа по субъектам РФ
5.7-5.8	Валовый потенциал производства тепла/электроэнергии по субъектам РФ (торф)
5.9	Запас торфа на месторождениях с запасами более 1 млн т (при содержании влаги 40%) по субъектам РФ
5.10	Запасы месторождений торфа при 40% влажности
5.11	Технический потенциал торфа по субъектам РФ
5.12-5.13	Технический потенциал производства тепла/электроэнергии по субъектам РФ (торф)

Выполненные в этой работе исследования по интегральным оценкам ресурсов, валового и технического потенциала ВИЭ для субъектов РФ выявили значительные объёмы этих потенциалов. Однако многие субъекты РФ занимают значительные площади, которые характеризуются существенным внутрорегиональным различием природно-климатических и социально-экономических

условий и, как следствие, – пространственной неоднородностью потенциалов солнечной и ветровой энергии, биомассы отходов сельскохозяйственного и лесохозяйственного производства. Усредненный по площади таких субъектов потенциал ВИЭ оказывается малоинформативным. Для принятия практических решений относительно использования ВИЭ (в том числе органических отходов) требуется детализация расчётов, по крайней мере, до уровня муниципальных образований; многофакторный анализ территории.

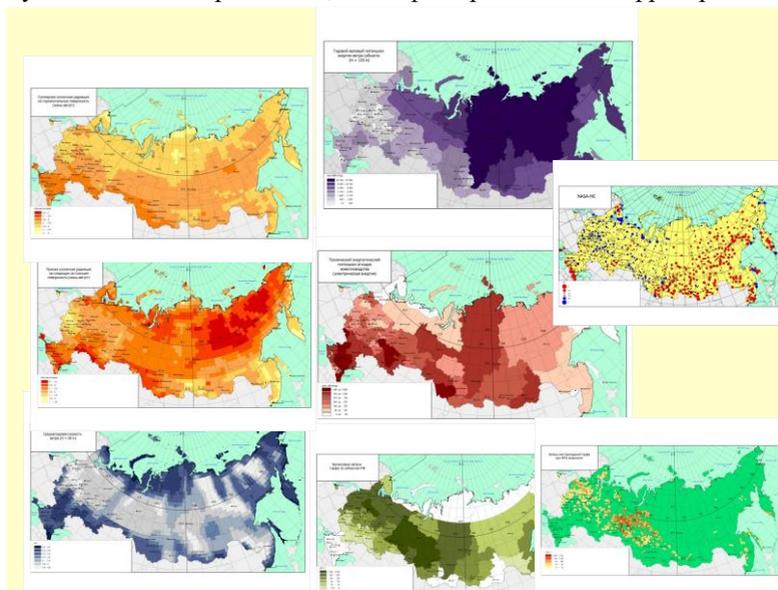


Рис. 1.23. Карты отдельных разделов Атласа ресурсов возобновляемых источников энергии на территории России [49]

Следует отметить, что ни один из представленных Атласов не дает возможности осуществить комплексный анализ территории Российской Федерации – как с точки зрения ресурсов, валового, технического энергетических потенциалов ВИЭ, так и с точки зрения пригодности территорий для размещения установок ветровой и солнечной энергетики. Эти задачи, несмотря на созданные к настоящему времени картографические произведения, остаются чрезвычайно актуальными.

В последние 10 лет в России, в том числе в связи с активизацией отрасли возобновляемой энергетики, были созданы ГИС в области

ВИЭ – как национального, так и регионального уровня. Одним из первых проектов стала ГИС ВИЭ РФ (<http://gisre.ru/>). К настоящему времени ГИС содержит интерактивные карты, отражающие ресурсы и потенциалы солнечной и ветровой энергии, которые определены на основе многолетних средних данных, представленных в базе данных (БД) NASA POWER в пространственной сетке ( $1^\circ \times 1^\circ$ ). В состав ГИС входят также карты объектов возобновляемой энергетики на территории РФ (рисунок 1.24), базы данных и карты расположения организаций, работающих в области ВЭ, а также климатические базы данных, содержащие характеристики приходящей солнечной радиации в той же пространственной сетке, что и карты. ГИС содержит также ряд региональных карт и баз данных, а также карты валового энергетического потенциала отходов сельскохозяйственного производства федеральных округов РФ.



Рис. 1.24. Скрин-шот ГИС ВИЭ РФ. Объекты солнечной электроэнергетики на территории России. Красным цветом выделены сетевые солнечные электростанции, строящиеся или действующие в рамках договоров на поставку мощности согласно Постановлению Правительства РФ 449 о 28 мая 2013 г.

В последние годы проведены исследования, в которых сделаны оценки потенциалов ВИЭ для субъектов РФ. Так, в [25]

приводятся результаты исследований возможности включения ресурсов ВИЭ в региональную энергетическую систему Томской области. Авторами были проанализированы ресурсы и потенциалы солнечной, ветровой, геотермальной энергии, а также органических отходов лесопромышленного, аграрно-промышленного комплексов, твердых бытовых отходов и отходов сточных вод. В работе использовались ГИС-технологии для создания баз данных об объемах ежегодно образующихся отходах и карт распределения ресурсов и энергетических потенциалов остальных типов ВИЭ. Проведенные оценки детализированы до уровня муниципальных районов. При пространственном анализе не учитывались инфраструктурные особенности территории, природные и экологические ограничения для использования ВИЭ и другие важные факторы.

Таким образом, в настоящее время существенно возрос интерес к геоинформационному картографированию ресурсов, потенциалов и иных характеристик возобновляемых источников энергии, что связано с широкими масштабами внедрения технологий ВЭ и практическими нуждами отрасли, которые могут быть решены средствами ГИС и картографирования, а именно,

- оценка и картографическое представление ресурсов и потенциалов ВИЭ;
- выбор перспективных площадок для сооружения объектов на ВИЭ, который должен проводиться с учетом широкого спектра факторов и условий территории;
- анализ наличия энергетической и транспортной инфраструктуры территории;
- анализ энергетического баланса и потребителей энергии и др.

По пространственному охвату создаваемые ГИС и атласы можно разделить на глобальные, национальные, региональные и локальные. В тоже время часть глобальных ГИС (в том числе веб-ГИС) имеют функции перехода на иные, более крупные масштабы и включают в себя растровые и электронные карты регионального уровня. Региональные и локальные ГИС и атласы характеризуются более широким тематическим охватом, чем глобальными, но могут быть сугубо узконаправленными (например, представлять только геотермальные источники энергии/биоэнергетические ресурсы и т.д. региона и связанную информацию).

## **Глава 2. Методические подходы к определению и картографированию ресурсов возобновляемой энергетики**

В 2000-х годах в России были предприняты исследования, имеющие целью оценку ресурсов, валового, технического и экономического потенциалов различных видов ВИЭ для субъектов РФ [16; 29; 85]. Наиболее полно методики оценки, а также полученные результаты были отражены в Справочнике [85], который вплоть до настоящего времени остается наиболее востребованным при проведении оценок потенциалов возобновляемой энергии регионов, федеральных округов и России в целом.

При оценке потенциалов ВИЭ субъектов РФ авторами Справочника были использованы следующие методические подходы. Для расчета валового солнечного энергетического потенциала регионов использовались карты суммарной солнечной радиации, опубликованные в [19]. Изолинии с карт распределения годовых сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность (рис. 2.1), переносились на административную карту России, и далее путем умножения площади региона на соответствующее значение солнечной энергии, определялся ее валовой потенциал. Понятно, что в таких расчетах главным фактором являлась площадь территории, и оценка характеризовалась большой погрешностью.

При определении технического потенциала солнечной энергии авторами Справочника обоснованно рассматривалась производительность солнечных энергетических установок по теплу и электроэнергии. На момент создания Справочника наиболее освоенными в отечественной практике являлись установки и системы солнечного горячего водоснабжения. Удельная годовая теплопроизводительность таких установок, определенная в работе [91] для различных географических точек РФ (всего 49 точек), была использована при определении технического потенциала солнечной энергии отдельных субъектов РФ. В случае отсутствия исходных данных значения удельной производительности тепловой

энергии находили путем интерполяции. Путем экспертных оценок структуры занятых площадей в каждом субъекте РФ было принято, что площадь, на которой потенциально могли бы быть размещены солнечные тепловые установки, составляет 0,8% площади каждого субъекта РФ. Для оценок технического потенциала по электроэнергии предполагалось, что площадь, потенциально отводимая в каждом субъекте под фотоэлектрические установки, может составлять не более 0,1%. В качестве установок для производства электроэнергии рассматривались монокристаллические фотоэлектрические модули (ФЭМ) с КПД 15%<sup>5</sup>.

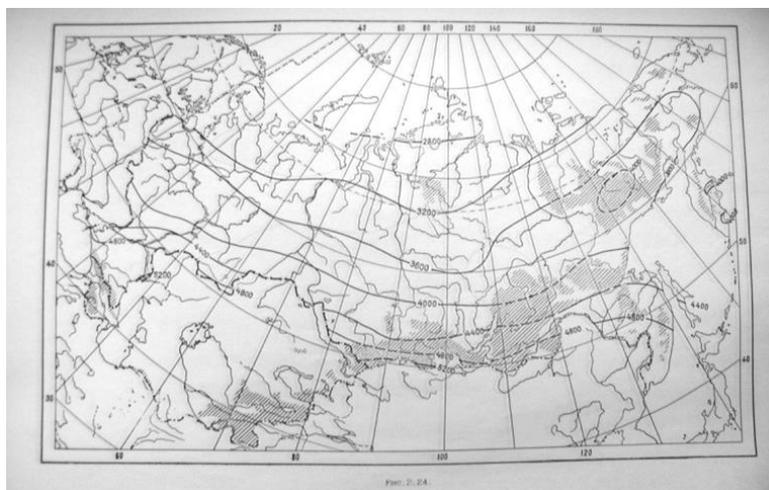


Рис. 2.1. Годовые суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность [19]

Для валового потенциала ветровой энергии в [19] было введено уточнение в определение этого понятия в связи с принципиальной невозможностью использовать весь объем ветровой энергии в пределах атмосферы над регионом. Было принято считать, что валовый потенциал энергии ветра – это часть

<sup>5</sup> В настоящее время на рынке представлены ФЭМ с КПД 20-24%.

среднегодовалого годового объема ветровой энергии, которая доступна для использования на заданной территории. Таким образом, в валовый потенциал входила энергия ветра (воздушной струи), которая содержится до высот в атмосфере, соответствующих высоте наиболее широко используемых ветроустановок (ВЭУ). На момент проведения расчетов высота типовых ВЭУ не превышала  $H = 60\text{--}80$  м<sup>6</sup>. Кроме того, в валовом потенциале было учтено восстановление воздушного потока после обтекания единичной ВЭУ, которое происходит, согласно ряду представлений, на расстоянии 10...20H. Это определяет количество ВЭУ, которое можно установить на единичной площади территории, и, следовательно, суммарный валовый потенциал заданной территории. Следует отметить, что в своих расчетах авторы [85] не учитывали изменение скорости ветра с высотой и использовали некоторую среднюю скорость ветра на высоте 75 м, не указывая источник данных. При определении технического потенциала были учтены следующие факторы:

- предполагалась невозможность использования для размещения ВЭУ сельскохозяйственных, промышленных, водохозяйственных, жилых и ряда других территорий;

- в качестве потенциальных для использования учитывались только территории со среднегодовой скоростью ветра на уровне флюгера более 5 м/с. На выделенных таким образом участках возможно использовать не более 10% площади;

- при расчетах энергии, которая вырабатывается реальными, используемыми на момент расчетов ВЭУ, учитывались КПД всех элементов установки и теоретически достижимый коэффициент использования энергии ветра (коэффициент Жуковского-Бетца).

Таким образом, в [85] была предложена методическая основа и проведены оценки валового и технического потенциала ВИЭ для всех субъектов РФ. Материалы [85] были использованы в ряде региональных программ развития ВИЭ, а также при составлении картосхем распределения ресурсов по территории РФ в пределах

---

<sup>6</sup> В настоящее время на рынке представлены ВЭУ с высотой оголовка турбины до 150 м.

федеральных округов. С другой стороны, проведенные оценки и методические подходы требуют модернизации в связи со следующими аспектами:

- многие использованные технические характеристики оборудования к настоящему времени изменились,
- ряд положений методики были основаны на экспертном мнении, их необходимо обосновать в связи с изменениями стандартов, экологических нормативов и прочее. Так, в методике очень обобщенно учитываются доступные земли (используются некоторые средние для России показатели без учета сложившегося их распределения по территории регионов).

Для решения последней задачи (определение доступных земель для размещения установок солнечной и ветровой энергетики) весьма продуктивными являются инструменты и методы картографии.

## **2.1. Ресурсы солнечной энергии: источники данных и методика определения**

### *Источники данных для определения ресурсов солнечной энергии*

Для оценки ресурсов солнечной энергии и потенциальной производительности станций при проектировании солнечных фотоэлектрических и водонагревательных систем и отдельных установок необходимы исходные данные о приходящей солнечной радиации. Точность проектирования определяется репрезентативностью значений радиации, достаточностью их номенклатуры, территориальной и временной частоты, т.е. разрешения во времени и в пространстве. Как показывает анализ результатов моделирования солнечных установок и история развития инструментов моделирования, для получения наиболее точных результатов необходимы многолетние данные о часовых значениях приходящей солнечной радиации с учетом угла наклона приемной поверхности. В отсутствие таких данных используются среднесуточные (среднедневные), среднемесячные, и – в крайнем случае – среднегодовые значения приходящей солнечной радиации в данной точке или на заданной территории.

Согласно [68], определить падающую солнечную радиацию в заданной точке можно несколькими методами:

- аналитическим, когда приход солнечной радиации в конкретной географической точке определяется расчетным путем;
- многолетними наземными измерениями в заданной точке;
- математическим моделированием распространения солнечной энергии в атмосфере на основе спутникового мониторинга и наземных данных.

В [34] приведен широкий спектр методов, позволяющий рассчитать величины приходящей солнечной радиации. В качестве одного из методов описана процедура расчета средней суточной суммы солнечной энергии на основе продолжительности солнечного сияния или уровня облачности. Основой расчета является регрессионное уравнение Ангстрема, в которое включены эмпирические постоянные. Последние определяются типом климата, подстилающей поверхности (растительности) и т.п. Определение этих постоянных приводит к сложности расчета с одной стороны, и погрешности результата, с другой. Аналогичная методика была разработана для территории СССР в работах [64, 65]. Востребованность этого подхода для такой большой территории, как СССР (и Россия) была связана с тем, что сеть метеорологических станций с гелиографическими измерениями в 4...5 раз гуще актинометрической сети. Расчеты на основе продолжительности солнечного сияния по 1100 станциям [84] и эмпирически определенных параметров, входящих в регрессионное уравнение Ангстрема, позволили оценить средние многолетние месячные суммы суммарной солнечной радиации по площади 5-градусных трапеций (144 трапеции к югу от 70°с.ш.), охватывающих всю территорию СССР.

Помимо расчетов на основе продолжительности солнечного сияния, в [34] изложены аналитические методы оценки различных составляющих солнечного излучения (прямая, рассеянная, суммарная радиация) за час, день, месяц, а также солнечной радиации, приходящей на наклонные поверхности при различных типах рассеяния (изотропное, анизотропное). Наиболее значимой для целей проектирования представляется методика определения

часовых сумм солнечного излучения на основе средних суточных сумм. Метод позволяет рассчитывать отношение часовой и дневной сумм суммарной солнечной радиации в зависимости от продолжительности дня и часа суток. Для обеспечения расчетов был проведен статистический анализ распределения часовых сумм солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, в зависимости от среднемесячных ее значений для ряда метеостанций США. На основе семейства полученных кривых, были предложены аналитические зависимости, которые дают наилучшие оценки указанных выше отношений для ясных дней. Безусловно, эти – и в целом все методы аналитических расчетов – имеют значительную погрешность. Однако они дают не только возможность проведения первичных оценок, но и предоставляют основу для разработки математических моделей приходящей солнечной радиации в различных географических точках и климатических условиях<sup>7</sup>.

Многолетние актинометрические наблюдения являются преимущественными (с точки зрения точности, номенклатуры и длительности рядов) источниками данных о приходящей солнечной радиации. Перечнем измеряемых и представленные в справочных изданиях актинометрические величин, дающих фактическую основу для оценок потенциала солнечной энергии, можно считать следующий [65]:

- часовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности,
- часовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности,
- средние, максимальные и минимальные суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность,
- средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность.

---

<sup>7</sup> Специалисты приводят, в частности, следующий довод к использованию указанных подходов: хоть аналитические методы лучше всего работают при ясном небе, именно в этих условиях солнечные установки дают наибольшую отдачу.

- параметры временного распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации и статистические характеристики суточных сумм за каждый день месяца.

Большое значение имеет частота измерений солнечной радиации, поскольку последняя характеризуется значительной изменчивостью в течение года, сезона и суток. Эта изменчивость обусловлена астрономическими факторами, прозрачностью атмосферы и режимом облачности. Важным является исследование характеристик и структуры этой изменчивости, их картографирование и оценка влияния на эффективность гелиоэнергетических установок<sup>8</sup>. При этом на этапе оценки ресурсов и валового потенциала солнечной энергии на заданной территории возможно использовать среднеголетние месячные значения прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность, информация о которой содержится в климатических справочниках. Для оптимизации режима гелиоустановок на стадии проектирования необходимо проводить моделирование работы установок и станций на основе среднеголетних часовых и/или суточных сумм падающей солнечной радиации и дополнительной метеорологической информации (температура воздуха, скорость ветра). Таким образом, при оценке потенциала солнечной энергии территории и проектировании станций большое значение имеют представительные актинометрические данные, позволяющие проводить анализ их временной структуры. Не меньшее значение имеет пространственное разрешение массивов данных, т.е. плотность сети актинометрических станций. При редкой сети станций зона экстраполяции актинометрических данных в пункты размещения гелиоустановок в большинстве случаев превышает зону репрезентативности актинометрических станций. Как будет

---

<sup>8</sup> Вариации интенсивности солнечной радиации *в течение дня* влияют на производительность гелиоустановки и на непрерывность выдачи производимой энергии. *Внутримесячная изменчивость* радиации определяет эффективность использования установленной мощности гелиоустановок и позволяет проектировать оборудование для длительного (месячного, сезонного) аккумулярования энергии. *Годовой ход* солнечной радиации позволяет прогнозировать режим работы гелиоустановок в течение года и оценивать их общую энергоэффективность.

показано ниже, эта проблема является особенно серьёзной для обширных территорий, в том числе для России.

Результаты обработки измерений приводятся в печатных изданиях (бюллетени, справочники) и в виде электронных баз данных (БД) с различной степенью доступа (открытые, коммерческие). В настоящее время доступны осредненные данные актинометрических станций СССР за периоды 1930-1980 гг., опубликованные в Справочнике по климату СССР, Научно-прикладном справочнике по климату СССР [84; 54] и ряде подобных изданий, в том числе региональных [86]. Кроме того, результаты наблюдений на актинометрических станциях РФ и мира аккумулированы в архивах Мирового центра радиационных данных (МЦРД) ГГО им. А.И.Воейкова – World Radiation Data Centre [152]. МЦРД располагает информационно-поисковой системой и систематически пополняемой базой данных о составляющих радиационного баланса, измеренных на станциях мировой актинометрической сети. МЦРД предоставляет пользователю в свободном доступе по запросу актинометрические данные следующих типов:

- суммарная солнечная радиация;
- рассеянная солнечная радиация;
- нисходящее излучение атмосферы;
- продолжительность солнечного сияния;
- прямая солнечная радиация;
- излучение земной поверхности;
- чистое излучение земной поверхности (восходящее);
- отраженная солнечная радиация;
- спектральные компоненты излучения.

Ряд электронных баз данных, имеющих выход в Интернет (в том числе зарубежных), также предоставляет данные актинометрических станций, находящихся на территории бывшего СССР: в открытом (RETScreen [163], NASA POWER [142]) или в коммерческом доступе (Meteonorm [155], ЗТИЕР [154]).

Итак, наземные актинометрические измерения обеспечивают достоверные данные, практически достаточные по своей номенклатуре для проведения оценок производительности

солнечных установок<sup>9</sup>. Проблемой является незначительное количество актинометрических станций на территории России и других стран. В связи с этим помимо использования радиационных данных и аналитических методов оценки приходящей солнечной радиации в заданной точке, прибегают к методам экстраполяции и интерполяции данных актинометрических станций. Однако, территория России характеризуется значительной климатической и ландшафтной неоднородностью. В результате на общий широтный характер изменения прихода солнечной радиации накладываются региональные особенности погоды, состояния атмосферы, альбедо поверхности и др. В связи с этим распространение результатов актинометрических наблюдений на значительную территорию сопровождается ощутимыми погрешностями. Методы и оценки погрешностей интерполяции/экстраполяции были подробно рассмотрены в работах специалистов ГГО им. А.И. Воейкова [64,65]. Показано, что при использовании экстраполяции средних суточных сумм суммарной радиации по данным наблюдений станции, расположенной на расстоянии 100 км от интересующего потребителя пункта, погрешность суточной суммы составляет:

- зимой и осенью 0,6...0,9 МДж/м<sup>2</sup> за сутки,
- весной и летом 3,2...3,6 МДж/м<sup>2</sup> за сутки.

Для пункта, удаленного на расстояние 200 км от данной станции, погрешность составит соответственно 0,8...1,5 и 4,6...4,8 МДж/м<sup>2</sup> за сутки. Для 300 км эти величины возрастут для условий июля уже до 6,1...6,5 МДж/м<sup>2</sup> за сутки. Экстраполяция среднемесячных суточных сумм суммарной радиации на те же расстояния сопровождается меньшими ошибками.

Для решения проблемы недостаточности наземных данных о ресурсах солнечной энергии в последние десятилетия все шире стали использоваться математическое моделирование и

---

<sup>9</sup> На актинометрических станциях не проводят, как правило, измерения солнечной радиации на различном образом ориентированные поверхности (с углом наклона, равным широте, переменный (оптимальный) угол), которые представляет основной интерес для солнечной энергетики.

спутниковые данные, которые позволяют восстанавливать поля приходящей солнечной радиации на регулярной сетке и с периодичностью 1 час и менее. В результате в современных реанализах, которые широко применяются в метеорологии, климатологии, океанологии и других научных областях, представлена также информация о солнечной радиации на сетке с высоким разрешением. Так, в реанализе ERA Interim [140] за каждый месяц года в интервале (1979 г. – настоящее время) на сетке с шагом  $0,25^\circ$  (последние 20 лет – с шагом  $0,125^\circ$ ) доступны среднемесячные значения следующих величин, относящихся к оценкам ресурсов солнечной энергии:

- продолжительность солнечного сияния;
- солнечная радиация на уровне поверхности Земли;
- солнечная радиация на верхней границе атмосферы и др.

В архивах NCEP-реанализа [143] содержатся аналогичные данные:

- нисходящий поток солнечной радиации при ясном небе, среднесуточные и 4-часовые значения;
- нисходящий поток солнечной радиации;
- суммарная и рассеянная радиация в различных областях спектра и др.

Использование метеорологических спутников для получения данных о различных компонентах солнечной радиации в конкретных географических точках или на значительных территориях является в настоящее время устоявшимся подходом в солнечной энергетике [129]. История использования спутниковых данных насчитывает более 30 лет [115; 124; 113]. При этом для расчета приходящей радиации используются либо физические модели переноса излучения в атмосфере с учетом спутниковых данных об усредненной по вертикали облачности и оптической толщины облаков, либо эмпирические модели, основанные на статистических связях результатов космического мониторинга и наземных наблюдений. В настоящее время развиваются конвергентные методы, объединяющие оба эти подхода, результатом чего стали полуэмпирические модели, которые учитывают взаимодействие проходящей радиации с газами

(включая водяной пар) и аэрозолями в атмосфере, спутниковые данные о содержании этих составляющих атмосферы и определяют таким образом индексы ясности. Значительный прогресс в развитии такого подхода к оценке компонентов солнечного излучения, верификация результатов моделирования по наземным измерениям [120; 131] привели к созданию различных баз данных и веб-сервисов, которые предоставляют пользователю временные ряды спутниковых данных о солнечной радиации. В [129] приведен актуальный перечень наиболее часто используемых баз данных (Таблица 2.1). Преимуществом спутниковых наблюдений являются глобальное покрытие (обычно между 60°с.ш. и 60°ю.ш.), равномерность и высокое разрешение пространственной сетки (вплоть до 1 – 10 км), длительность периодов измерений (20 лет и более) и высокое временное разрешение данных (суточные, трехчасовые, часовые). Недостатками данного метода получения данных является невозможность учета локальных особенностей, например, сложного (особенно горного) рельефа, приводящего к затенению места, погрешности данных в связи со значительной изменчивостью условий облачности, концентрацией аэрозолей и водяного пара, большим альбедо поверхности (особенно для соляных пустынь, заснеженных территорий, побережий). В связи с этим при проектировании обязательным является учет данных актинометрических станций, максимально приближенных к площадке солнечной станции. Как указывалось в [125], наилучшие результаты оценки падающей радиации могут быть получены при использовании многоканальных спутниковых измерений (в видимом и инфракрасном диапазонах спектра). На результаты может повлиять также положение Солнца и широта места. Так, согласно [129], при больших зенитных углах облака верхнего яруса могут отбрасывать тень на нижние облака, которые в этом случае могут фиксироваться как свободная от облачности земная поверхность. Дальнейшее развитие спутниковых методов измерения падающей солнечной радиации идет по пути усовершенствования датчиков радиации и моделей распространения солнечной радиации в атмосфере [126].

Таблица 2.1

Базы данных, содержащие временные ряды приходящей на поверхность Земли солнечной радиации, полученные на основе спутниковых данных (по [129])

Название	Периодичность данных	Охват территории	Адрес в сети Интернет
NSRDB update	30 минут	США	<a href="http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/">http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/</a>
NASA SRB	3 часа	Глобальная	<a href="http://gewex-srb.larc.nasa.gov/">http://gewex-srb.larc.nasa.gov/</a>
NASA POWER	1сутки	Глобальная	<a href="https://power.larc.nasa.gov/">https://power.larc.nasa.gov/</a>
DLR-ISIS	3 часа	Глобальная	<a href="http://www.pa.op.dlr.de/ISIS/">http://www.pa.op.dlr.de/ISIS/</a>
HelioClim	1 час	Европа – Африка	<a href="http://www.soda-is.com/eng/helioclim/">http://www.soda-is.com/eng/helioclim/</a>
SOLEMI	1 час	Европа – Африка – Азия	<a href="http://wdc.dlr.de/data_products/services/solarenergy/">http://wdc.dlr.de/data_products/services/solarenergy/</a>
SolarGIS	30 минут	Глобальная	<a href="http://solargis.info/">http://solargis.info/</a>
EnMetSol	1 час	Европа – Африка	<a href="https://www.uni-oldenburg.de/en/physics/research/ehf/energiemeteorology/enmetsol/">https://www.uni-oldenburg.de/en/physics/research/ehf/energiemeteorology/enmetsol/</a>
IrSOLaV	1 час	Европа – Африка – Азия – Америка	<a href="http://irsolav.com/">http://irsolav.com/</a>
CM-SAF (SARAH)	1 час	Европа – Африка	<a href="http://www.cmsaf.eu/">http://www.cmsaf.eu/</a>
SUNY- Solar Anywhere	30 минут	Северная Америка	<a href="http://www.solaranywhere.com/">http://www.solaranywhere.com/</a>
MACC RAD	3 часа	Глобальная	<a href="http://www.soda-pro.com/es/help/macc-rad/automatic-access">http://www.soda-pro.com/es/help/macc-rad/automatic-access</a>
PVGIS	1 час	Европа – Африка – Азия	<a href="http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/">http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/</a>
Meteonorm	ТМУ (1 час)	Глобальная	<a href="http://www.meteonorm.com/">http://www.meteonorm.com/</a>
CPTEC/ INPE	1сутки	Южная Америка	<a href="http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/">http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/</a>

Vaisala	1 час	Глобальная	<a href="http://www.vaisala.com">http://www.vaisala.com</a>
Australian Bureau of Meteorology	1 час	Австралия	<a href="http://www.bom.gov.au/climate/data-services/solar-information.shtml">http://www.bom.gov.au/climate/data-services/solar-information.shtml</a>
Мировой центр радиационных данных (МЦРД, WRDC)	1 час – для зарубежных актинометрических станций, 1 сутки – для российских станций	Глобальная (данные наземных актинометрических измерений)	<a href="http://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm">http://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm</a>

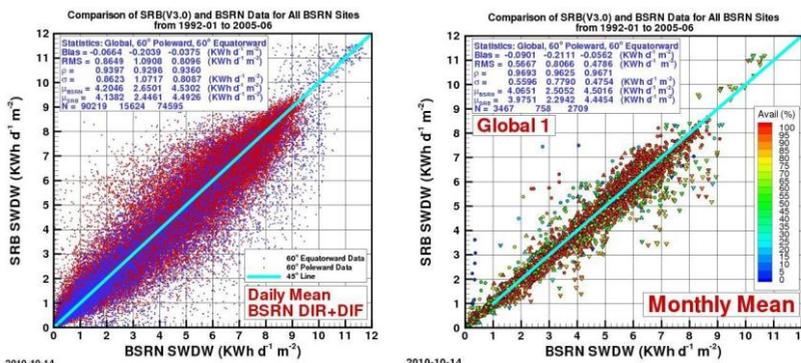
Широкое использование при прогнозировании и проектировании в солнечной энергетике получила глобальная по охвату база данных NASA POWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources) [142], краткая характеристика которой, в том числе верификация данных для территории России, проводилась ранее в работах [11, 68; 69]. БД NASA POWER основана на данных реанализов MERRA-2, GEOS 5.12.4. При ее создании были использованы также результаты следующих исследовательских программ, проектов и моделей:

- NASA/GEWEX Surface Radiation Budget (SRB) Project, CERES Fast Longwave and Shortwave Radiative Fluxes (FLASH Flux) – для получения исходных актинометрических данных;
- Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) – источники метеорологических данных;
- Global Precipitation Climatology Project (GPCP) – источники данных об осадках [148].

Использование БД NASA POWER определяется ее выраженной специализацией и удобным пользовательским интерфейсом. Номенклатура характеристик солнечной радиации соответствует потребностям современной солнечной энергетики и включает в себя среднесуточные (для каждого дня (суток) в период с 1983 г. по настоящее время) и многолетние средние месячные значения суммарной солнечной радиации на верхней границе атмосферы и на уровне Земли; радиацию, приходящую на различным образом ориентированные по-

верхности, индексы ясности, скорость ветра на высотах 10, 50 м и более, а также производные величины, с разрешением  $(1 \times 1)^\circ$  и  $(0.5 \times 0.5)^\circ$ . Массивы данных структурированы по возможным потребителям (фотоэлектрические панели и солнечные коллекторы, солнечные кухни, системы с аккумуляторами энергии и тепла и т.д.). Ряды суточных сумм суммарной солнечной радиации позволяют в некотором приближении не только определять и проводить анализ природных ресурсов и валовых потенциалов, но и прогнозировать среднюю многолетнюю производительность сетевых солнечных станций.

Как указано выше, верификация данных о составляющих падающей солнечной радиации и скорости ветра является важнейшей процедурой при использовании БД NASA POWER и других источников информации. Сравнение результатов NASA и наземных измерений проводилось, согласно [148], при каждой модернизации базы данных. Результаты верификации показывают, что среднеквадратичное отклонение двух массивов данных (NASA POWER – наземные наблюдения) составляет 1,00, 0,87, 0,57, 0,25 кВтч/м<sup>2</sup>/сутки соответственно для срочных наблюдений (3 часа), среднесуточных, среднемесячных и среднегодовых дневных сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (Рис. 2.2).



а б

Рис. 2.2. Результаты верификации данных NASA POWER о падающей солнечной радиации (SRB SWDN) по наземным данным мировой сети актинометрических измерений (BSRN SWDN): а – средние суточные суммы, б – среднемесячные суточные суммы суммарной солнечной радиации, кВтч/м<sup>2</sup>/сутки [148].

Однако при верификации учитывались лишь единичные актинометрические станции России, территория которой в силу высокого широтного расположения сложна с точки зрения моделирования прихода радиации. Поэтому в [40; 68; 74] было проведено детальное сопоставление массивов данных (NASA POWER – наземные наблюдения) о среднемесячных суточных суммах суммарной и прямой солнечной радиации<sup>10</sup> для широкого перечня актинометрических станций РФ (Рис. 2.3). Из результатов статистической обработки (диаграммы рассеяния) видно, что погрешность значений суммарной солнечной радиации из NASA POWER ниже, чем погрешность значений прямой солнечной радиации на следящую за солнцем поверхность.

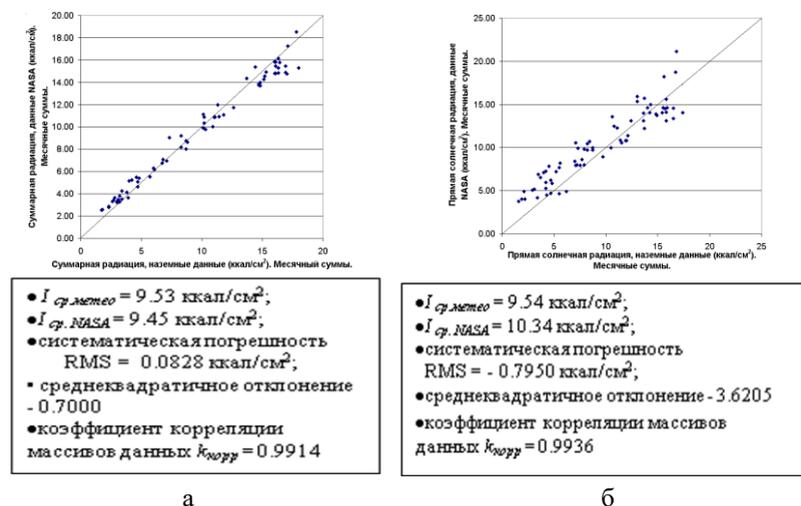


Рис. 6. Результаты верификации данных NASAPOWER о приходящей солнечной радиации по наземным данным российской сети актинометрических измерений: а – среднемесячные суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность; б – среднемесячные суточные суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность [68].

<sup>10</sup> Анализ суточных сумм прямой радиации на нормальную к лучу поверхность важен для проектирования установок с концентраторами солнечной энергии, поэтому сравнение наземных и спутниковых данных необходимо проводить и по этому параметру.

При верификации реанализов и баз данных следует учитывать специфику солнечной энергетики, а именно: если для сетевых фотоэлектрических станций погрешность прихода солнечной радиации практически линейно определяет ошибку расчета производительности станций, то для автономных солнечных установок и станций такой однозначной зависимости нет. Кроме того, при оценке величины погрешности исходных данных следует руководствоваться не только сравнением с истинными величинами солнечной радиации (наземными измерениями), сколько ошибкой расчета на их основе энергетического выхода (производительности, доли покрытия нагрузки потребителя в автономных системах) и финансовых затрат (потери при переоценке или недооценке требуемой мощности солнечных установок, емкости аккумуляторов и т.д. для достижения заданного уровня производительности). Такого рода оценки проводились в ряде отечественных исследований. Так, например, в [44] было показано, что средние суточные суммы суммарной солнечной радиации в экстремальных последовательностях<sup>11</sup> из данных NASA POWER для Московского региона в 1,5 – 2,0 раза выше, чем по данным наземных измерений. Следовательно, расчет автономной солнечной энергетической установки, работающей круглый год и гарантировано покрывающей заданную нагрузку, на основе данных NASA POWER приведет к значительному недоразмериванию системы т.е. необоснованному занижению площади ФЭМ и емкости АКБ. Для сезонных установок, работающих только в летнее время, расчет состава и мощности систем по данным NASA POWER не приводит к существенным отклонениям от результатов по данным наземных измерений.

---

<sup>11</sup> В [44] экстремальной последовательностью называют последовательность значений суточных сумм суммарной солнечной радиации длиной  $i$  с минимальным значением суммарной  $\sum \text{Сол}_{\min}(i)$  и минимальными суточными суммами солнечной радиации  $\overline{\text{Сол}_{\min}(i)}$  среди рассматриваемого периода (например, года, месяца и т.д.). Продолжительность таких последовательностей является определяющей при выборе емкости аккумуляторов и мощности фотоэлектрических установок в автономных солнечных системах.

Здесь следует остановиться также на проблеме генерации часовых последовательностей поступления солнечной энергии на приемную поверхность. При генерализованных оценках производительности сетевых станций возможно использовать ряды суточных данных или даже осредненные за месяц среднесуточные величины падающей солнечной радиации на различным образом ориентированные поверхности [90; 92]. Однако при анализе работы автономных солнечных систем точность таких оценок не велика: малая детализация исходных данных не позволяет адекватно спроектировать емкость аккумулирующих устройств, поскольку не учитываются внутрисуточные и межсуточные колебания прихода радиации, в том числе так называемые «бессолнечные» дни (дни с критически низким уровнем прихода солнечной энергии). Поэтому используются различные методы генерации последовательностей часовых сумм суммарной радиации и других, необходимых для моделирования, метеорологических величин. В [119] обоснованно отмечается, что, несмотря на значительное количество различных подходов и программных средств, которые призваны симулировать (моделировать) приход солнечной радиации, эти методы должны учитывать специфику различных территорий (состояние атмосферы, характер рельефа, подстилающей поверхности). Там же для условий Боготы (Колумбия) был предложен метод аппроксимации аналитическими функциями распределения плотности вероятности приходящей солнечной радиации и температуры воздуха для каждого часа каждого дня года. Достаточно подробно вопросы генерации последовательностей рассмотрены в [34, глава 19], а также в работах ГГО имени А. И. Воейкова [99]. В [34] изложена методика расчета проектного года, когда на основе восьмилетнего ряда метеорологических данных на территории США «для каждого месяца года выбирался тот месяц (из всех лет наблюдений), для которого сумма солнечного излучения была наиболее близка к средней за восемь лет. Набор выбранных месяцев составлял проектный год». Концепция типичного метеогода (Typical Meteorological Year – TMY) является развитием этого подхода и была реализована в США, а также позднее специализированными компаниями для других регионов мира. Электронный ресурс *Meteonorm* [155] на основе базы данных

более чем 7000 метеостанций мира предлагает провести генерацию типичного метеогода в формате месячных, суточных или часовых последовательностей прихода солнечной радиации для поверхностей любой ориентации. Программное средство TRNSYS – The Transient System Simulation Program [167] позволяет генерировать часовые последовательности метеоданных на основе среднемесячных и среднесуточных значений, полученных как из многолетних наземных наблюдений, так из тематических баз данных (например, БД NASA POWER). В итоге возможно получать исходный набор метеорологической информации на регулярной пространственной сетке высокого разрешения, охватывающей регион исследования. Примеры использования средства TRNSYS для моделирования работы солнечных и гибридных энергоустановок в отечественной практике широко представлены в работах специалистов ОИВТ РАН, в частности, в [68]. Решением проблемы часовых последовательностей в определенной степени является использование все более детальных реанализов (Таблица 2.1), временное разрешение которых уже сейчас достигает часовых интервалов.

Таким образом, проблема недостаточности данных для оценок ресурсов солнечной энергии, проектирования и прогноза производительности солнечных энергоустановок в настоящее время решается путем активного развития методов математического моделирования и использования спутниковых данных. Получаемые в результате многолетние массивы данных на регулярных пространственных сетках и с постоянной периодичностью во времени представлены в базах данных реанализов, а также в специализированных базах данных. Целый ряд таких БД размещены в открытом доступе, или на условиях коммерческого договора в сети интернет. Форма предоставления информации в них – многолетние последовательности прихода солнечной радиации на поверхность Земли, производные актинометрические характеристики с различной степенью осреднения (многолетние средние за сутки, месяц, год), карты, результаты расчетов, в том числе энергетической и экономической эффективности установок и систем солнечной энергетики с учетом специфики конкретного места (как физико-географической, так и

экономической). Исходные актинометрические данные при необходимости позволяют осуществлять процедуры генерации суточных и часовых последовательностей, востребованных при проектировании энергоустановок.

Использование в оценках и расчетах такого рода источников информации для территории России становится все более широким. Однако следует подкреплять это использование верификацией данных о падающей солнечной радиации на основе наземных актинометрических наблюдений. Как указывалось выше, важно оценивать погрешность баз данных и реанализов с позиций солнечной и ветровой энергетики, а именно, с точки зрения погрешности оценки производительности солнечных и ветровых сетевых станций и автономных установок.

### ***Методика определения ресурсов и потенциалов солнечной энергии***

Ввиду отсутствия единого подхода к терминам «ресурсы» и «потенциалы» возобновляемых источников энергии (раздел 1.1), в качестве ресурсов солнечной энергии можно рассматривать средние за год/ средние за отдельные сезоны суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальные или наклонные поверхности единичной площади на уровне Земли [11]. Как уже указывалось выше, валовой потенциал возобновляемого источника энергии – это средний годовой объем энергии, содержащийся в данном виде возобновляемого источника при полном ее превращении в полезно используемую энергию [85]. Исходя из этого определения, в качестве валового потенциала солнечной энергии на заданной территории часто принимают годовые суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на всю площадь территории. Если рассматривается валовый потенциал для географической точки, то он рассчитывается как годовая сумма суммарной солнечной радиации, приходящей на поверхность единичной площади и заданной ориентации в пространстве (обычно в кВтч/м<sup>2</sup>/год). Для определения валового потенциала – ввиду значительной межгодовой изменчивости прихода солнечной энергии – используются многолетние ряды данных (реанализы,

наземные измерения) или аналитически полученные оценки с учетом координат и средних характеристик состояния атмосферы в заданной точке или территории.

Как указывалось выше, технический потенциал возобновляемого источника энергии – часть валового потенциала, преобразование которой в полезно используемую энергию возможно при данном уровне развития технических средств и при соблюдении требований по охране окружающей среды. При определении технического потенциала солнечной энергии следует учитывать несколько факторов.

Солнечные фотоэлектрические установки при их эксплуатации ориентируют на юг и располагаются под наиболее оптимальным углом для сбора максимального количества энергии. Если системы не снабжены трекерами (устройствами слежения приемных поверхностей за Солнцем), то наиболее оптимальными углами наклона являются угол, равный широте места  $\varphi$  (для неподвижных поверхностей) и угол равный  $(\varphi \pm 15^\circ)$  для теплого и холодного полугодия соответственно (для установок с сезонно изменяемым углом наклона). В соответствии с этим в качестве технического потенциала солнечной энергии в точке можно в общем случае рассматривать годовую производительность типового по своим техническим характеристикам фотоэлектрического модуля (ФЭМ), имеющего угол наклона, равный широте (кВтч/м<sup>2</sup>/год). Здесь м<sup>2</sup> относится к площади приемной поверхности фотоэлектрического модуля. При этом предполагается, что ФЭМ работает на бесконечную нагрузку или присоединен к электрической сети, т.е. вся произведенная им энергия потребляется.

Если требуется определить технический потенциал солнечной энергии для заданной территории, то в качестве такового можно принять годовую производительность сетевой фотоэлектрической станции, занимающей всю площадь территории, состоящей из типовых ФЭМ, установленных под углом, равным широте, максимально близко друг от друга (с учетом затенения) (кВтч/год). Удобно в качестве технического потенциала рассматривать годовую производительность солнечной сетевой станции

некоторой единичной мощности (например, 1 МВт), либо станцией, занимающей некоторую единичную плотность территории, например гектар, или км<sup>2</sup>. Тогда технический потенциал, рассчитанный на основе представительных рядов данных о приходе солнечной радиации с учетом угла наклона приемных поверхностей будет выражен в кВтч/год/МВт или кВтч/год/км<sup>2</sup>. Безусловно, занять солнечными электростанциями обширные территории чаще всего невозможно, поэтому если поставлена задача определить технический потенциал солнечной энергии, например, муниципальных районов, областей, федеральных округов и т.д., то следует учитывать расположение на этой территории таких объектов, или влияние таких факторов, которые препятствуют размещению на них ФЭМ. Таковыми являются, например, водные объекты, селитебные территории, земли специального назначения. Более подробно о факторах, влияющих на размещение объектов возобновляемой энергетики (ВЭ) будет сказано ниже, в разделе 2.4.3.

Экономический потенциал возобновляемых источников энергии определяется как часть технического потенциала, использование которого экономически целесообразно, т.е. полученная от ВИЭ энергия конкурентоспособна (имеет более низкую себестоимость) по сравнению с энергией от иных источников. Как видно, определение этого вида потенциала требует расчета и сопоставления себестоимости энергии от возобновляемого источника, а также энергии, которая в данной местности поставляется от альтернативных источников, в том числе с использованием углеводородного топлива. Такого рода оценки и анализ требует не только знания физико-географических, но и экономических характеристик территории, результат определяется местной спецификой, поэтому обычно оценки экономического потенциала проводятся на локальном уровне (для России – на уровне муниципальных образований, поселений). Хотя известны укрупненные оценки экономического потенциала для субъектов Российской Федерации [85]. В представленной работе задача определения и картографирования экономического потенциала солнечной и ветровой энергии не ставится.

## **2.2. Ресурсы ветровой энергии: источники данных и методика определения**

### *Источники данных для определения ресурсов ветровой энергии*

Оценка и картографирование ресурсов ветровой энергии представляется достаточно сложной задачей в связи с временной и пространственной неравномерностью ветра. Рассмотрим применяемые в настоящее время подходы к определению и картографическому представлению ветровых энергетических ресурсов и потенциалов на заданной территории. Для систематизации характеристик ветровой энергии в конкретном регионе с целью ее эффективного энергетического использования, как правило, разрабатывается ветроэнергетический кадастр, представляющий собой «совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющих определить его энергетическую ценность». Начиная с 50-х годов XX века, в СССР были развернуты широкие работы по созданию ветроэнергетических кадастров, хотя при этом северные и восточные районы страны практически не рассматривались. Основными источниками данных о скорости ветра, значимых для ветровой энергетики являются:

- результаты многолетних измерений на метеорологических и аэрологических станциях;
- реанализы как результат математического моделирования, проводимого с использованием данных спутниковых и наземных наблюдений;
- краткосрочный ветромониторинг непосредственно на площадке предполагаемого размещения ВЭУ.

Для разработки ветроэнергетических кадастров СССР основой являлись наблюдения на опорной сети метеорологических станций [45, 46, 51, 32, 33]. Россия (а ранее – СССР) располагает крупнейшей сетью метеорологических станций, на которых ведутся многолетние наблюдения. Эти наблюдения охватывают периоды в десятки лет, выполняются несколько раз в сутки. Разработаны и используются единая программа и методика сбора, обработки и обобщения данных с классификацией мест наблюдения по степени

их открытости. Результаты измерений с различной степенью детализации представлены в бюллетенях, климатических справочниках и электронных базах данных. С 1970-х годов, проводились измерения ветровых характеристик на высотных метеорологических и телевизионных мачтах, в результате чего были получены точечные данные о вертикальном профиле ветра в приземном слое высотой до 500 м [18]. К настоящему времени увеличилась частота измерений скорости и направления ветра на опорной сети метеорологических станций РФ (до 8 раз в сутки), а некоторыми станциями ведутся непрерывные наблюдения в автоматическом режиме, что позволяет зафиксировать быстропеременные процессы, включая порывы ветра и его максимальные пульсации, периоды затишья, малых ветров и т.д.

В то же время проблема оценки ветровых энергетических ресурсов настолько сложна в силу временной и пространственной неоднородности ветра, что во многих случаях сеть метеостанций позволяет провести лишь интегральные оценки. Для более детального рассмотрения ресурсов территории или проведения прогнозных оценок производительности при осуществлении проектов строительства ВЭС требуются статистические оценки, математическое моделирование или подробный ветромониторинг на местности – по крайней мере, в течение 1–2 лет – с дальнейшим сопоставлением его результатов с многолетними наблюдениями на ближайшей метеостанции.

Рассмотрим исходные характеристики скорости ветра необходимы для оценки и картографирования ресурсов, валового и технического потенциалов ветропотенциала, согласно [53]:

1. Климатические характеристики, позволяющие оценить ресурсы и потенциалы ветровой энергии региона: средние годовые, месячные, суточные и срочные значения скорости и направления ветра, вертикальные профили средних скоростей ветра в приземном слое атмосферы (до 100–150 м).

2. Параметры, определяющие выбор ветроэнергетических установок (ВЭУ), оптимальных режимов их работы, и позволяющие сделать прогноз производительности ВЭУ: повторяемость скоростей и направлений ветра по грациям;

данные о непрерывной продолжительности энергетических штилей и скоростей ветра выше заданного значения (во всем диапазоне рабочих высот современных ВЭУ до 100-150 м). Предпочтительными для такого рода задач являются, вообще говоря, непрерывные последовательности скорости ветра со скважностью нескольких секунд, полученные на ветроизмерительных мачтах высотой порядка 100 м. Такого рода измерения с осреднением значений скорости и направления ветра за 10-минутные интервалы проводятся в настоящее время при ветромониторинге для выбора площадки ВЭС.

3. Характеристики ветра, используемые при проектировании, расчетах прочности конструкций и устойчивости работы ВЭУ: интенсивность атмосферной турбулентности; максимальные скорости и порывы ветра; оценка их продолжительности и повторяемости для всего диапазона рабочих высот ВЭУ.

Говоря о доступности результатов измерений на метеорологических станциях ветровых характеристик, следует отметить, что до 1991 г. все данные станций СССР собирались региональными центрами и предоставлялись на бумажных носителях. До настоящего времени в России сохранилась практика выпуска учреждениями Росгидромета бюллетеней, отражающих изменение климата за определенный период, которых также можно рассматривать в качестве источников данных. Однако с 1991 г. в течение длительного времени метеоданные предоставлялись почти исключительно на коммерческой основе. С 2006 г. в сети Интернет стали доступны как архивные метеоданные, так и текущие измерения метеостанций по срокам наблюдений. Среди них электронные ресурсы Метеоцентр, Погода России; Погода и климат, Расписание погоды (РП5), Mundomanz, World Weather, National Climatic Data Center. Одним из интернет-ресурсов, обеспечивающих свободный доступ к ряду архивных метеоданных, является Мировой центр данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИГМИ) [150]. Для целей ветроэнергетики наиболее предпочтительными являются многолетние ряды первичных данных, имеющие вид «время измерения – результат

измерения». Тогда архивные данные позволяют построить диаграммы повторяемости скорости ветра по градациям, которые необходимы для расчета энергии воздушной струи (ветрового потока). С другой стороны, для проведения корреляционного анализа результатов локального ветромониторинга и данных ближайшей метеостанции зачастую достаточно осредненных значений. Поэтому для оценок ветроэнергетических характеристик (на высоте флюгера) могут быть использованы результаты многолетних рядов наблюдений, представленные в климатических справочниках [84; 54], а также в справочниках, содержащих данные за отдельные годы (Климатологический справочник СССР).

С точки зрения ветроэнергетики метеорологические измерения как источник данных для ветроэнергетики обладают рядом несомненных достоинств:

- длительность рядов наблюдений;
- значительное количество метеостанций на территории России<sup>12</sup>.

Однако оценивать энергетические характеристики ветра по этим данным с необходимой для современной ветроэнергетики достоверностью в большинстве случаев сложно, поскольку:

- высота флюгера метеостанций непостоянна (для различных метеостанций она изменяется от 5 до 40 метров) и мала по сравнению с высотой расположения турбин современных ветроэнергетических установок (ВЭУ);
- затенённость флюгера деревьями, домами, возвышенностями и т.п. не обеспечивает требуемой точность ветровых характеристик, свойственных местности;
- измерения на метеостанциях проводятся дискретно в единые синхронные сроки, что с учетом высокой частоты колебаний скорости ветра может привести к существенным погрешностям при оценке ветроэнергетических характеристик.

---

<sup>12</sup> Кроме метеостанций Государственной гидрометеорологической службы для расчета ветроэнергетических характеристик могут быть использованы данные ведомственных станций, из которых наиболее широкая сеть – метеостанции аэропортов. Они практически не прерывали деятельность в 1990-е годы, но в некоторые периоды качество их данных, предназначенных для узкоспециальных целей обеспечения полетов, снижалось.

Частота сети метеорологических станций России, несмотря на ее гораздо *большую* величину по сравнению с актинометрической сетью, ставит также задачу интерполяции данных. Это задача является очень важной в связи с существенной пространственной неоднородностью рельефа и ландшафта, а также необходимостью оценок ветроэнергетических ресурсов и потенциалов на территориях страны, находящихся на значительных расстояниях от мест постоянных метеонаблюдений.

Таким образом, данные метеорологических станций, которые длительное время использовались как практически единственная информационная основа для ветроэнергетических расчетов, имеет целый ряд ограничений, которые следует учитывать. С одной стороны, длительность наблюдений позволяет рассматривать метеорологические ряды данных как генеральную совокупность, на которой выполняется свойство стабилизации частоты; и, следовательно, методы математической статистики способны обеспечить достоверные оценки энергии ветра и потенциальной производительности ВЭС. С другой стороны, для ветроэнергетических оценок проблемой остается малые высоты измерений ветровых характеристик на метеостанциях. Для преодоления последней из названных проблем используются некоторые предположения относительно изменения скорости ветра с высотой.

В настоящее время в основном используются две модели изменения скорости ветра с высотой  $V(z)$ : степенной или логарифмический профиль. Большой объем исследований этой проблемы был проведен в ГГО им. А. И. Воейкова с позиций метеорологии [18], и в [53] – с позиций ветроэнергетики. Перечень известных зарубежных и отечественных методов моделирования ветровых параметров в приземном 100-метровом слое атмосферы приведен в таблице 2.2. Следует отметить, что существует ряд неопределенностей в оценках профилей ветра в соответствии с этими подходами:

- нет обоснования предельной высоты применимости степенного или логарифмического закона в приземном слое (согласно различным представлениям, эта высота составляет 25 ... 75 м);

- обе модели  $V(z)$  (и, следовательно, точность определения скоростей ветра на высотах 100 м и более) весьма чувствительны к значениям скорости ветра на нижнем уровне;
- как видно из перечисленных в таблице 2.2 методик, большое влияние на результаты расчетов оказывает значение параметра шероховатости  $z_0$ . Определение этого параметра проводилось в многочисленных исследованиях и характеризуется значительными вариациями. Например,  $z_0$  для спокойной водной поверхности или гладкого льда по разным оценкам изменяется от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  м; для равнины, луга с травяным покровом до 0.2 м вариации  $z_0$  составляют от 0.01-0.03 до 0.008 м. Поэтому наиболее оптимальным при проведении ветромониторинга являются измерения скорости ветра на разных высотах, позволяющие определять значения параметров высотного профиля.

Таблица 2.2.

Аппроксимации высотного профиля скорости ветра [53]

№ п/п	Методика, разработчик	Источники данных о скорости ветра	Аппроксимация высотного профиля	Комментарии
1	Универсальная модель	Соседние гидрометеорологические станции (ГМС)	$V(z) = V_{\text{фл}} * (z/h_{\text{фл}})^m$ $m = 1/7$ для суши $m = 1/10$ для моря	$V_{\text{фл}}$ – значения скорости на высоте флюгера $h_{\text{фл}}$ (10-12 м)
2	WASP, RISO, Дания	Соседние ГМС и модель для $z_0$ (параметра шероховатости)	$V(z) = V_0 * \ln(z/z_0)$	$z_0$ – параметр шероховатости, $V_0$ – скорость ветра на уровне шероховатости. Модель двухпараметрическая и позволяет определить $V_0$ и $z_0$ , если имеются значения скорости ветра хотя бы на двух уровнях

3	1) NASA, NREL, США 2) АО ВИЭН, 2002 г.	1) Реанализ 2) Соседние ГМС	$V(z) = V_{\text{фл}} * (z/h_{\text{фл}})^m$	$V_{\text{фл}}$ , $h_{\text{фл}}$ – скорость ветра, высота флюгера. Если есть данные о скорости ветра на уровне флюгера и на
4	1) ЦАГИ, 1960 2) ГГО, 1989	Соседние ГМС-аналоги	То же	некоторой высоте, то величину $m$ можно определить аналитически
5	ФЛЮГЕР-5.0, ЦАГИ	Соседние ГМС, данные на высоте 100 м соседней аэрологической станции	$V(z) = V_{\text{фл}} * (z/h_{\text{фл}})^m$ $m = \frac{\ln(V_{100}/V_{\text{фл}})}{\ln(h_{100}/h_{\text{фл}})}$	Параметр $m$ определяется из результатов аэрологических измерений на высоте 100 м

Авторы [53], в качестве возможного решения указанных проблем, предлагают собственную модель «Сэндвич», которая является двухслойной/трехслойной и определяет профили ветра в слоях атмосферы заданной толщины. Базой для определения профилей ветра являются данные наземных гидрометеостанций и сети аэрологических станций, которые в течение длительного времени вели на территории СССР высотные измерения различных метеорологических параметров, в том числе, скорости ветра.

Важным является вопрос о суточной и годовой изменчивости профиля ветра (т.е., в частности, показателя  $m$  в степенной аппроксимации). Большое влияние на профиль ветра и его изменчивость оказывает температурная стратификация в нижнем слое атмосферы, а через нее – турбулизация воздуха. В [18] выделены наиболее существенные аспекты данной проблемы:

- наблюдается годовой и суточный ход профилей средних скоростей ветра, т.е. изменение параметра  $m$  в степенной зависимости;
- наиболее устойчивым в течение суток является вертикальный профиль скорости ветра в ноябре, декабре и январе. В эти месяцы амплитуда суточного хода параметра  $m$  составляет лишь 0.05-0.06. Максимальная амплитуда вариаций  $m$  – в конце весны и летом, когда

она достигает почти 0.3, т.е. практически равна среднему суточному значению самого показателя степени;

- вертикальные профили средних месячных скоростей изменяются в зависимости от времени суток и сезона года в весьма широких пределах. Пределы изменения  $m$  для средних месячных профилей – от 0.15 (июнь, 15 часов) до 0.48 (июль, 3 ч).

Приведенные здесь результаты исследований полезны для оценки репрезентативности ветровых профилей, полученных из коротких или выборочных рядов наблюдений.

Анализ среднегодовых профилей скоростей ветра на высотах 0-600 м в шести регионах России, приведенный в [53], показывает, что наблюдается быстрое нарастание скорости ветра в приземном 100-150 метровом слое и почти постоянные по высоте скорости ветра в диапазоне высот от 150 м до 600 м. В связи с этим был в [53] сделано предположение, что увеличение высоты башен ВЭУ свыше 70-80 м в силу выхода высотных профилей скоростей ветра на примерно постоянные значения не приводит, как правило, к существенному выигрышу по производительности ветроустановок, и может не улучшить, а ухудшить их экономические показатели. Однако, задача определения ресурсов ветровой энергии, прогноз производительности ВЭУ с учетом профиля ветра требует дальнейших исследований.

Как и для целей солнечной энергетики, для ветроэнергетических расчетов, создания карт ресурсов и потенциалов, а также предпроектных работ, в настоящее время все шире используются реанализы и специализированные базы данных (таблица 2.1). В качестве примера номенклатуры ветровых характеристик, представленных в БД, можно рассмотреть данные NASA POWER, в которой доступны ряды среднесуточных и среднегодовых скоростей ветра, а также средняя многолетняя скорость ветра за период с 1983 г. по настоящее время на высотах 2, 10, 50 м; максимальная и минимальная скорость, направление ветра для высоты 50 м. Эти величины для каждой точки земной поверхности на 0,5-градусной пространственной сетке были получены в рамках проекта Goddard's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), который в качестве массива метеорологических данных включал в себя данные реанализа Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA-2) [141]. Представительные ряды

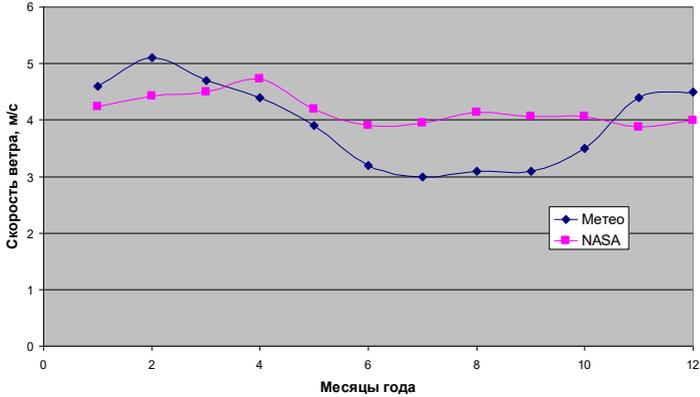
средних суточных скоростей ветра позволяют определить повторяемость скорости ветра для дальнейших оценок мощности воздушной струи и потенциальной производительности типовых ВЭУ (технический потенциал ветровой энергии).

Верификация данных о скорости ветра в БД NASA POWER имеет большое значение для подтверждения их достоверности при использовании в расчетах и картографировании ресурсов ипотенциалов ВИЭ. В [148, стр. 11], осредненные за 10-летний период скорости ветра  $V_{\text{NASAPOWER}}$  на высоте 10 м для условий типа «аэропорт» сравнивались со средними значениями за 30-летний период наблюдений на метеостанциях, максимально близких к узлам сетки базы данных. Систематическая ошибка среднемесячных значений составила 0.37 м/с, а среднеквадратичная ошибка – около 1.65 м/с, что для мест с малой средней скоростью ветра является существенной величиной. Данные базы NASA POWER дают обычно заниженные значения скоростей ветра по сравнению с наземными измерениями в горных районах. Это связано с тем, что здесь сказываются неучтенные в моделях локальные условия ускорения воздушных потоков в ущельях и на перевалах, горных хребтах и пиках. В целом пространственное разрешение базы данных NASA POWER не дает возможности учитывать значительные топографические вариации или границы вода/суша.

Для верификации ветровых характеристик БД NASA POWER нами была сделана выборка среднемесячных скоростей ветра на высоте 10 м по данным ряда российских метеостанций. В качестве территории сравнения рассматривался Южный федеральный округ. На рис. 2.4 приведены среднемесячные значения скорости ветра по данным метеостанций и данным NASA POWER для высот флюгерных измерений [40, 74]. Видно, что в ряде случаев наземные данные и результаты БД NASA POWER соответствуют достаточно удовлетворительно (Таганрог, Астрахань, Волгоград, Сочи, Майкоп). Для других метеостанций (Ставрополь, Ростов-на-Дону, Черкесск) имеют место значительные расхождения, причем не только по абсолютным значениям скорости ветра, но и в сезонном ходе. В то же время диаграмма рассеяния (рис. 2.5) показывает достаточно удовлетворительное совпадение массивов данных:

- $V_{\text{ср.метео}} = 3.90 \text{ м/с}$ ;  $V_{\text{ср. NASA}} = 3.85 \text{ м/с}$ ;
- систематическая погрешность  $\text{RMS} = -0.08 \text{ м/с}$ ;
- среднеквадратичное отклонение – 0.43;
- коэффициент корреляции массивов данных  $k_{\text{корр}} = 0.82$ ;
- дисперсия значений (NASA)  $\sigma_{\text{NASA}} = 0.48$ .

Сравнение среднемесячных скоростей ветра на высоте флюгера.  
Ростов-на-Дону (1936 - 1980 гг.)



Сравнение среднемесячных скоростей ветра на высоте флюгера.  
Таганрог (1936 - 1980 гг.)

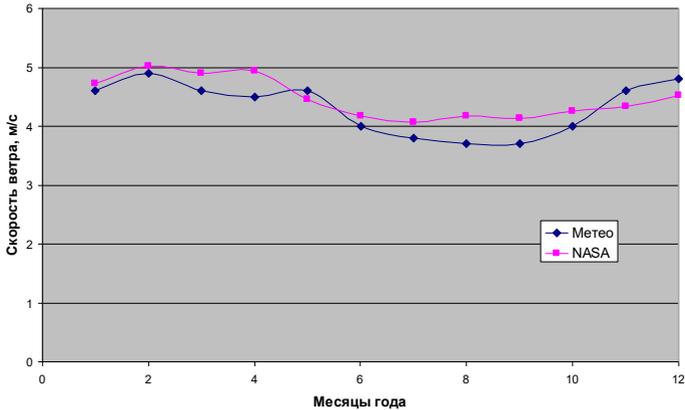


Рис. 2.4. Результаты верификации среднемесячных значений скорости ветра на высоте 10 м из базы данных NASA POWER по наземным измерениям

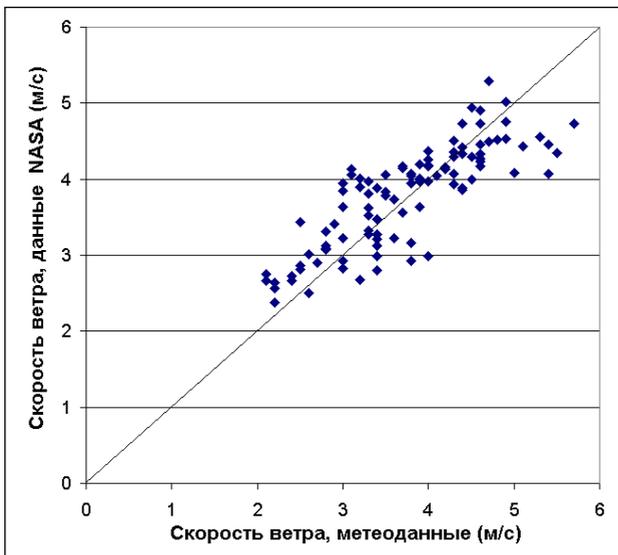


Рис. 2.5. Диаграмма рассеяния для среднемесячных скоростей ветра, полученных из базы данных NASA POWER и наземных метеонаблюдений Южного федерального округа РФ

Таким образом, для интегральных (первичных) оценок ветровых энергетических ресурсов на территории России использование базы данных NASA POWER, по-видимому, является оправданным. Однако, при «точечных» расчетах, т.е. обоснованиях локального валового и технического ветропотенциала необходимо использовать более наземные измерения на требуемой высоте (ветромониторинг) или результаты реанализа с большим разрешением в пространстве и частотой во времени[40].

Как указывалось выше, проблемы недостаточности сети метеорологических и аэрологических станций, а также малая высота измерений скорости ветра на метеостанциях определяют необходимость получения дополнительных массивов данных и усовершенствования традиционных методов расчета. Для генерализованных оценок ресурсов и потенциалов, а также для предпроектных работ широко используют данные реанализов. Для расчета потенциальной годовой производительности станции,

а также для выбора площадки под ветростанцию утвердилась практика проведения 1-2-годичных мониторингов скоростей ветра (ветромониторинг<sup>13</sup>) на различных высотах. Получаемые данные могут конвертироваться в удобные форматы для дальнейшей обработки. Результаты ветромониторинга рассматриваются как наиболее качественные и точные данные для проведения ветроэнергетических расчетов. Действительно, они дают, с одной стороны, гораздо более обширный набор данных о параметрах ветрового потока (ветромониторинг подразумевает непрерывные измерения с шагом осреднения 10 мин) на высотах, близких к высотам современных ветроэнергоустановок (до 100м). Однако очевидными являются недостатки этого метода, в частности, короткий период измерений (1-2 года, реже – 3 года) для получения необходимой точности оценки производительности станции. Недостаточность периода измерения частично устраняется и дополняется многолетними данными наблюдений референтных метеостанций, а также в последнее время – и данными реанализов.

С другой стороны, ветромониторинг может обеспечить верификацию результатов восстановления скорости ветра (реанализов) на высотах от 10 до 100-150 м. Однако в настоящее время процедура ветромониторинга проводится в России в единичных, причем, коммерческих проектах. Поэтому доступ к таким данным по понятным причинам затруднен, использовать их для расчета ветровых ресурсов и потенциалов на больших территориях, тем более, проводить картографирование этих ресурсов, невозможно. Имеются, однако, единичные примеры открытых данных ветромониторинга для проектов в некоторых граничащих с РФ странах, выполненных на средства международных организаций (например, программа создания ветрового атласа Казахстана на средства ПРООН).

---

<sup>13</sup> Ветромониторинг – процедура измерения метеорологических параметров, нацеленная на оценку производства электроэнергии проектируемым ветропарком. Для проведения измерений используется мачта ветромониторинга, на которой на разных высотах располагаются датчики (анемометры, флюгеры, термометр, барометр и др.). Впервые его начали проводить в конце 70-х годов XX века в Дании.

### **Методика определения потенциалов ветровой энергии**

Под ветроэнергетическим ресурсом понимается обычно средняя мощность воздушной струи единичной площади сечения (плотность энергии ветрового потока), которая при экспериментально измеренной повторяемости скорости ветра определяется как:

$$P^{пл.эн.} = \frac{1}{2} \rho \cdot \sum_{i=1}^k v_i^3 \cdot n_i$$

где  $P^{пл.эн.}$  – плотность энергии ветрового потока, Вт/м<sup>2</sup> вертикальной поверхности;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

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

$n_i$  – повторяемость скорости ветра в  $i$ -ом интервале скоростей, безразмерная величина;

$k$  – количество интервалов (градаций) скорости ветра.

Оценку ветроэнергетических ресурсов рекомендуется проводить на разных высотах. Это обусловлено тем, что в составе современных ветроэлектростанций (ВЭС) мощностью 50-100 и более МВт используются ветроустановки (ВЭУ) единичной мощности 2-3 МВт и высотой оси ветроколеса 50-100 м и более. При работе в энергоизолированных узлах можно рассматривать ВЭУ (и рассчитывать ветроэнергетические ресурсы) с высотой оси ветроколеса 50-80 м при единичной установленной мощности ВЭУ порядка 1 МВт. Для зон децентрализованного электроснабжения, в особенности, расположенных в удаленных регионах, при оценке ресурсов следует ориентироваться на ВЭУ с высотой оси ветроколеса порядка 30-50 м при единичной установленной мощности ВЭУ от десятков до сотен кВт. Таким образом, при комплексной оценке ресурсов ветроэнергетики заданной территории следует проводить расчеты и картографировать плотность энергии ветрового потока на высотах 30, 50 и 100 м.

В качестве валового потенциала энергии ветра можно рассматривать годовую производительность единичной идеальной ветроэнергетической установки (при оценке валового потенциала в точке), или годовую производительность ветроэнергетических

установок, размещенных на заданной территории с максимальной плотностью (при оценке валового потенциала территории). Для единичной ВЭУ валовый потенциал в точке рассчитывается следующим образом:

$$E_{Val} = 10^{-3} \cdot P^{пл.эн.} \cdot T \cdot S^{омет.} \cdot k^{Ж.-Б.}$$

где  $E_{Val}$  – валовый потенциал энергии ветра, кВт·ч/год;

$P^{пл.эн.}$  – средняя годовая плотность энергии ветрового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$T$  – количество часов в году, час;

$S^{омет.}$  – площадь ометаемой поверхности (площадь ветроколеса), м<sup>2</sup>;

$k^{Ж.-Б.} = 0,593$  – коэффициент Жуковского-Беца (предельная теоретическая эффективность преобразования энергии ветрового потока в полезную энергию ветровой турбиной).

Для определения валового ветрового потенциала территории следует рассчитать количество ВЭУ, которое может быть на ней установлено. При выборе расстояния между ВЭУ необходимо минимизировать экранирование расположенных рядом ВЭУ. Восстановление энергии ветра после ее снижения при трансформации во вращательный момент ветроколеса происходит, по данным разных авторов, на расстоянии от 8 до 20 диаметров ветроколеса ( $D$ ) вдоль направлений ветра с максимальной скоростью, и от 4-7 диаметров в направлениях, где скорости ветра минимальны. В данной работе при определении валового энергетического потенциала расстояние между ВЭУ было выбрано равным  $10D$ , исходя из преемственности отечественного методического подхода и обеспечения сопоставимости полученных результатов с результатами, приведенными в ранее выполненных оценках ветропотенциала [36, 37]. Тогда количество ветроустановок, размещенных максимально плотно на территории площадью  $S^{Территории}$  в предположении равновероятного распределения ветра:

$$N_{ВЭУ} = (1000/nD)^2 S^{Территории}$$

$D$  – диаметр ветроколеса ВЭУ, м<sup>2</sup>;

$S^{Территории}$  – общая площадь территории, км<sup>2</sup>;

$n$  – количество диаметров ветроколеса между рядами ВЭУ.

Поскольку ВЭУ различной высоты комплектуются ветроколесами различного диаметра, при оценке валового ветропотенциала следует указывать диаметра ветроколеса (или высоту оси ветроколеса), использованных при расчетах. Анализ представительной базы современных ветроустановок, производимых и эксплуатируемых в странах ЕС, США, Канаде, Японии, Индии, Китае, Корее, показывает, что обычно отношение диаметра к высоте оси ветроколеса близко к единице. Исходя из введенного выше соотношения, количество ветроустановок, максимально плотно располагаемых на единице площади территории для высоты (или диаметра ветроколеса) ВЭУ 30 м составляет 11 шт./км<sup>2</sup>; 50 м – 4 шт./км<sup>2</sup>; 100 м – 1 шт./км<sup>2</sup>.

Тогда валовый ветроэнергетический потенциал территории (кВтч) площадью  $S^{Территории}$  определяется как:

$$E_{Val}^{Терп} = 10^{-3} \cdot P^{пл.эн.Т} \cdot S^{омет} \cdot k^{Ж.-Б.} \cdot N^{ВЭУ}$$

При этом, поскольку плотность энергии ветрового потока существенно изменяется в течение года, для определения валового потенциала можно использовать выражение, учитывающее сезонные изменения повторяемости скоростей ветра :

$$E_{Val}^{Терп} = 10^{-3} \cdot S^{омет} \cdot k^{Ж.-Б.} \cdot N^{ВЭУ} \cdot \sum_{j=1}^{12} (P_j^{пл.эн.} \cdot T_j)$$

где  $P_j^{пл.эн.}$ ,  $T_j$  – средняя месячная плотность энергии ветрового потока и количество часов в каждом месяце.

Технический ветроэнергетический потенциал – это количество электроэнергии, которое может быть выработано из энергии ветрового потока при существующем уровне развития технологий и с учетом ограничений по размещению ВЭУ на данной территории. Иными словами, если валовый потенциал – годовая производительность идеальной единичной ВЭУ (или ВЭУ, занимающими всю заданную территорию), то технический потенциал – это производительность единичной ВЭУ (или нескольких ВЭУ) с учетом достигнутых в настоящее время в типовых современных ветроустановках КПД преобразования энергии ветра и КПД электрического оборудования.

Обычно технические характеристики ветроустановки отображаются мощностной характеристикой, т.е. зависимостью мощности ВЭУ ( $P_i^{мошн.ВЭУ}$ ) от скорости ветра. Зависимость  $P_i(v_i)$  представляется либо в виде таблицы, либо в виде кривой для каждой модели ветрогенератора. Тогда технический ветроэнергетический потенциал – годовая производительность реальных ВЭУ, занимающих с максимальной плотностью некоторую территорию, – может быть рассчитан как:

$$E_{Tech}^{Терр} = 10^{-3} \cdot N^{ВЭУ} T \sum_{i=1}^k (P_i^{мошн.ВЭУ} \cdot n_i)$$

где  $E_{Tech}^{Терр}$  – технический ветроэнергетический потенциал территории, кВт·ч/год;

$P_i^{мошн.ВЭУ}$  – мощность типовой ВЭУ в  $i$ -м интервале (градации) скоростей ветра, Вт;

$N^{ВЭУ}$  – количество ВЭУ, которое можно установить на заданной территории;

$n_i$  – средняя годовая повторяемость скорости ветра в  $i$ -м интервале (градации) скоростей ветра (безразмерная);

$T$  – количество часов в году, час.

В связи со значительной сезонной изменчивостью скорости ветра, как и в случае валового потенциала, более точным является оценка сезонных или месячных технических потенциалов (производительности ВЭУ), сумма которых дает искомую величину потенциала. При оценке технического потенциала важен также учет доступных территорий для размещения ВЭУ и факторов, которые определяют эту доступность (методы оценки факторов будут рассмотрены в разделе 2.4.3).

### 2.3. Ресурсы биоэнергетики:

#### источники данных и методики определения

Крупнейшим поставщиком возобновляемой энергии в мире является биоэнергетика - отрасль энергетики, основанная на

использовании биомассы для получения тепловой, электрической и механической энергии в виде тепла, электричества и моторного топлива. По данным аналитического обзора Всемирной биоэнергетической ассоциации (The World Bioenergy Association), общемировое использование энергии из биомассы достигло почти 60 ЭДж ( $60 \times 10^{18}$  джоулей), что составляет 10% от общего объема производства энергии в мире<sup>14</sup>. Сырьём для биоэнергетики, вообще говоря, может быть любое органическое вещество. На практике для получения энергии используются следующие виды биомассы: специально выращенные для энергетических целей сельскохозяйственные культуры, или энергетические культуры (кукуруза, сахарное сорго, мискантус и др.), древесные отходы лесозаготовки и деревоперерабатывающей промышленности, отходы животноводства и растениеводства (навоз крупного рогатого скота, свиней, птицы и др.; солома зерновых культур, стебли подсолнечника и кукурузы, ботва овощных культур, шелуха подсолнечника и др.), бытовые органические отходы, осадки сточных вод, активный ил очистных сооружений, биомасса макро- и микро-водорослей и др. По своему происхождению ресурсы биоэнергетики можно подразделить на природные и антропогенные. К природным ресурсам могут быть отнесены запасы биомассы лесов, лугов, водных объектов. Антропогенные ресурсы биоэнергетики создаются в процессе жизнедеятельности человека и животных, а также в сельскохозяйственной и производственной деятельности человека. Антропогенные ресурсы подразделяются на биомассу, специально произведённую для переработки в энергетические продукты, и биомассу, являющуюся побочным продуктом основного производства, – отходом этого производства (например, отходы пищевой, целлюлозно-бумажной промышленности и т.д.).

В мире ежегодно образуется огромное количество органических отходов. Масштабы образования этих отходов таковы, что их природная ассимиляция без вмешательства человека невозможна, а вредное воздействие на окружающую среду принимает

---

<sup>14</sup> Производство энергии из биотоплива – крупнейший возобновляемый источник в мире. [Электронный ресурс] <http://www.infobio.ru/news/3954.html> (Дата обращения - 24.06.2017г.).

катастрофический характер. В то же время развитие технологий привело к тому, что эти отходы становятся источником сырья для переработки и получения ценных продуктов. Опыт многих стран показал, что перспективным является переработка органических отходов с производством энергии [27]. При этом решаются две проблемы – производство энергии и утилизация отходов, что очень актуально для широкого класса регионов (в том числе и России), включая удалённые от централизованного энергоснабжения и рекреационные объекты, где использование традиционных источников энергии невозможно или нежелательно. Большую роль в развитии технологий получения энергии из отходов сельскохозяйственного производства в России сыграли работы Е.С. Панцхавы<sup>15</sup>.

В качестве ресурсов для биоэнергетики в данной работе рассматривались отходы агропромышленного комплекса – растениеводства и животноводства. Ресурсами биоэнергетики будем называть фактические объёмы биомассы, доступные для переработки их с получением энергии (электрической, тепловой) или топлива (биогаза). Валовым и техническим потенциалом биоэнергетики будем считать соответственно, полное количество энергии, заключенное в этой биомассе, и количество энергии, которое возможно произвести из доступной биомассы современными технологиями с учетом экологических и иных ограничений. Анализ ранее проведенных работ и наши исследования позволяют заключить, что методика определения ресурсов, валового и технического потенциалов биоэнергетики включает обязательные этапы, которые не зависят от типа этих ресурсов:

1 этап – определение источников биомассы и объёмов ее производства (или образования), которые теоретически могут быть использованы для производства энергии (например, урожай

---

<sup>15</sup> Е.С. Панцхава, М.Г. Беренгартен, С.И. Вайнштейн Биогазовые технологии. Проблемы экологии, энергетики, сельскохозяйственного производства. Федеральное агентство по образованию РФ. – М.: [Московский государственный университет инженерной экологии, ЗАО «Центр «Экорос»], 2008. – 217 с.; Е.С. Панцхава Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз: теория и практика. – М.: Русайнс, 2014. – 972 с.; Е.С. Панцхава Электростанции на биотопливе (биомассе).- М.: Русайнс, 2016. – 340 с.

сельскохозяйственных культур, поголовье скота, численность населения, расчетная лесосека).

2 этап – определение доли биомассы, которая в соответствии с территориальными физико-географическими и социально-экономическими факторами может быть использована для получения энергии (например, доля отходов от урожая сельскохозяйственных культур, норма отходов различных видов скота, количество отходов жизнедеятельности населения)

3 этап – определение энергосодержания указанной доли биомассы;

4 этап – определение количества тепловой, электрической энергии или топлива, которое может быть получено с учетом современных технологических возможностей, экологических и иных ограничений.

В соответствии с изложенными этапами масса ежегодно образующихся органических отходов  $M_i$  рассчитывается с использованием статистических данных годового урожая растительных культур или поголовья скота  $N_i$  на основе экспериментально определенных норм образования отходов (например, соотношения отходов и полезной части растения)  $L_i$ :

$$M_i = N_i * L_i,$$

здесь  $i$  – вид растительных культур и (или) направление животноводства.

На основе определённой таким образом массы отходов валовый энергетический потенциал отходов ( $Q_i$ ) рассчитывался как произведение массы отходов на их удельное энергосодержание ( $K_i$ ):

$$Q_i = M_i * K_i$$

Тогда суммарный валовый биоэнергетический потенциал рассматриваемой территории, учитывающий все виды органических отходов сельскохозяйственного производства (обозначены индексом  $i$ ), определяется как:

$$Q = \sum_{i=1}^n M_i * K_i$$

В качестве основного источника данных для определения валовых биоэнергетических потенциалов в отечественной практике используются материалы Федеральной службы государственной статистики (Росстат), которые содержат величину ежегодных валовых сборов сельскохозяйственных культур и поголовье скота и птицы в масштабе субъектов РФ [145] и по муниципальным районам и городским округам субъектов [144]. При этом данные приводятся как в сумме для хозяйств всех категорий, так и детализировано – для сельскохозяйственных организаций; крестьянских (фермерских) хозяйств и хозяйств индивидуальных предпринимателей; хозяйств населения. При расчёте валового энергетического потенциала отходов сельского хозяйства представляется целесообразным не учитывать отходы, образующиеся в хозяйствах населения в силу невозможности их сбора (концентрации). В связи с этим нами была введена характеристика «доступный валовый потенциал отходов сельского хозяйства», которая подразумевает потенциал органических отходов, образующихся в производственном секторе сельского хозяйства – в сельскохозяйственных организациях и крестьянско-фермерских хозяйствах, иными словами всех отходов, кроме отходов хозяйств населения.

Расчёты объемов отходов (ресурсов) и их валового энергетического потенциала проводятся раздельно по отдельным видам сельскохозяйственных культур и направлениям животноводства. Это связано с тем, что различные виды отходов отличаются нормами образования и удельным энергосодержанием.

Энергетический потенциал отходов растениеводства в наших работах рассчитывался по основным видам сельскохозяйственных культур Российской Федерации:

- зерновые и зернобобовые культуры: пшеница (озимая и яровая), рожь (озимая и яровая), тритикале (озимая и яровая), ячмень (озимая и яровая), просо (озимая и яровая), овес, рис, гречиха, кукуруза;

- масличные культуры: подсолнечник, рапс (озимый и яровой), соя;

- картофель, свекла и другие овощи.

Коэффициенты, определяющие соотношение полезной части растения и отходов для каждой культуры, а также удельное энергосодержание отходов установлены по литературным данным и представлены в таблице 2.3 [42].

Таблица 2.3

Коэффициенты для расчёта массы отходов растениеводства и их энергосодержания.

<b>Вид исходной биомассы</b>	<b>Соотношение отходов и полезной части растения, кг/кг</b>	<b>Удельное энергосодержание отходов, Ккал/кг</b>
Зерновые культуры	1,0	3500 (для сухой соломы)
Кукуруза на зерно (стебли)	1,2	3270 (для воздушно-сухих тходов)
Рапс озимый и яровой	1,8	3660
Соя	1,3	3800
Подсолнечник на зерно:		
- стебли	3,5	3200
- лузга	0,18	3750
Картофель	0,33	2000 (для сухой ботвы)
Овощи	0,33	2000

В проектах стран Европейского Союза, реализуемых в последние годы и имеющих целью широкое использование растительных отходов сельского хозяйства для производства энергии, большое внимание уделяется древесным отходам обрезки многолетних насаждений – садов и виноградников. По технологии выращивания винограда ежегодно, после уборки урожая, в осенне-зимний период производится обязательная обрезка растений, в результате которой с каждого гектара виноградников удаляются тонны обрезанной лозы. Также ежегодно производится формирующая и санитарная обрезка

плодовых насаждений региона. В таблице 2.4 приведены рассчитанные нами по литературным данным нормы образования древесных отходов, образующихся при обрезке растений, и их энергосодержание.

Таблица 2.4  
Нормы образования отходов садоводства и виноградарства  
и их энергосодержание

Вид древесных отходов	Удельная масса отходов, т/га в год	Удельная теплота сгорания, МДж/кг	Энергия, выделяющаяся при сжигании отходов, собранных с 1га в год, т у.т./га в год
Обрезки виноградной лозы	3	16	1,638
Обрезки плодовых деревьев	5	10,5	1,791

В расчетах ресурсов и валового энергетического потенциала биомассы отходов животноводства и птицеводства учитываются отходы содержания следующих видов скота и птицы:

- крупный рогатый скот (КРС);
- свиньи;
- мелкий рогатый скот (МРС): козы и овцы
- птица (куры-несушки и бройлеры).

В соответствии с известными зоотехническими нормами выход физиологических отходов на одну голову скота и птицы принимаются следующими:

крупный рогатый скот (КРС)	30 кг/сутки при влажности 85%,
свиньи	4 кг/сутки при влажности 85%,
kozy, овцы (МРС)	4 кг/сутки при влажности 70%;
курица-несушка	73 кг/год при влажности 75%;
бройлер	42 кг/год при влажности 75%.

Теплотворная способность 1кг сухого навоза и помёта принималась в наших расчетах равной 2000 ккал. Нормы

образования отходов животноводства, выраженные в количестве сухого вещества, и удельное энергосодержание этого сухого вещества приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Нормы образования отходов животноводства и их энергосодержание

<b>Вид скота</b>	<b>Нормы образования отходов, тонн сухого вещества/голову в год</b>	<b>Удельное энергосодержание отходов, т у.т./т сухого вещества</b>
КРС	1,64	0,29
Свиньи	0,22	0,29
МРС	0,44	0,29
Птица:		
куры,	0,01825	0,29
бройлеры	0,01050	0,29

В данной работе не рассматривается потенциал твердых коммунальных отходов и осадков сточных вод, а также отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности. Методика оценки этих ресурсов и соответствующих энергетических потенциалов кратко изложена в [11].

#### **2.4. Последовательность и особенности региональной оценки и картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии**

Комплексное картографирование ресурсов и потенциалов возобновляемых источников энергии для территорий целесообразно выполнять в несколько этапов (рис. 2.6). В первую очередь должны быть произведены оценка, анализ и картографирование ресурсов, которые выражаются в значениях характеристик возобновляемых источников энергии. Под ресурсами, как указывалось выше, будем принимать объемы физических носителей возобновляемой энергии. Тогда для ветровой энергии характеристиками ресурсов являются скорость и повторяемость скорости ветра. Для солнечной энергии – приходящая солнечная радиация на горизонтальную поверхность.

На втором этапе на основе собранных массивов данных о природных ресурсах различных видов ВИЭ проводятся расчеты теоретического количества энергии, которое содержится в данном

виде ресурсов, а также производительности энергоустановок с учетом их технических параметров. Полученных в результате расчетов массивы данных отображаются на картах валового и технического потенциала ВИЭ.

На третьем этапе проводится пространственный анализ ресурсов, валового, технического потенциала и факторов, влияющих на его использование. Результатом является районирование территории по перспективности развития конкретной отрасли возобновляемой энергетики (ВЭ) и строительства объектов энергогенерации. Необходимость детального рассмотрения ряда факторов обуславливает переход на третьем этапе комплексного картографирования на локальный уровень анализа территории.

Следует отметить, что выбранная территория должна, в первую очередь, обладать достаточным валовым и техническим потенциалом ВИЭ. На перспективных территориях целесообразно в дальнейшем рассматривать факторы, препятствующие или ограничивающие строительство объектов на возобновляемых источниках.

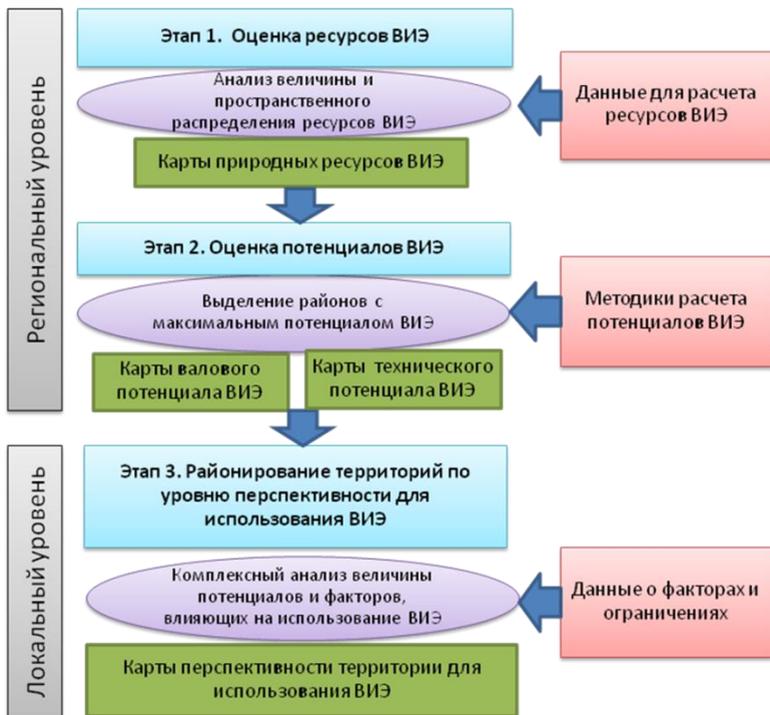


Рис. 2.6. Схема методики оценки и комплексного картографирования ресурсов и потенциалов ВИЭ

Соответственно, тематика карт, необходимых для обеспечения оценки ресурсов и потенциалов ВИЭ, подразделяется на 3 блока:

- карты ресурсов ВИЭ;
- карты валового и технического потенциала ВИЭ;
- карты факторов, ограничений и предпосылок, влияющих на размещение объектов на ВИЭ.

Итогом оценки, проводимой по данной методике, должна стать карта пригодности и перспективности территории для размещения объектов возобновляемой энергетики. Рассмотрим требования, которым должны соответствовать карты, разрабатываемые на каждом этапе комплексного картографирования ресурсов и потенциалов ВИЭ, на примере солнечной и ветровой энергетики.

**Первая группа – карты ресурсов ВИЭ** должна отражать характеристики ветровой и солнечной энергии, необходимые для оценки в дальнейшем валового и технического энергетического потенциалов территории.

Как правило, каждая отдельная карта отражает только один из рассматриваемых возобновляемых источников энергии. На картах *ресурса* ветровой энергии должны быть представлены: средние скорости ветра на различных высотах, соответствующих высотам современных ветроустановок (например, 10, 50, 100, 150 м); повторяемость скоростей ветра на различных высотах; максимальная скорость ветра. Карты *ресурса* солнечной энергии должны отражать значения средних суточных сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (за год, теплые полгода, летний период, отдельные месяцы). Также – для анализа возможности и результативности использования гибридных установок на ВИЭ – важным является составление карт корреляции среднемесячных значений солнечной радиации и скоростей ветра.

Кроме того на картах должны быть максимально полно отражены данные всех доступных источников о характеристиках ВИЭ, а именно:

- данные метеорологических и актинометрических станций;
- результаты моделирования характеристик ветровой и солнечной энергии с использованием спутниковых данных;
- данные локального ветромониторинга (при наличии таковых).

**Вторая группа - карты валового и технического потенциала ВИЭ**, отражающие расчетные характеристики мощности воздушной струи, производительности ветроустановок (для ветрового технического энергopotенциала), производительности солнечных установок (для солнечного технического энергopotенциала).

При этом целесообразно использовать следующие определения потенциала возобновляемых источников энергии [85], указанные выше в разделе 1.1:

Валовый потенциал ВИЭ – это годовой объем энергии рассматриваемого вида ВИЭ, который теоретически может быть превращен в электрическую или тепловую энергию.

Технический потенциал ВИЭ – часть валового потенциала, преобразование которого в полезную энергию возможно с учетом современных технических характеристик используемого оборудования и при соблюдении экологических нормативов.

В данной работе предлагается считать характеристиками валового потенциала и представлять в картографическом виде: для солнечной энергии – значения прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность и суммарной солнечной радиации на различно ориентированные поверхности (среднегодовые и средние по сезонам суточные суммы), для ветра - энергию воздушной струи, проносимую за год через перпендикулярную потоку площадку единичной сечения на разных высотах, соответствующих характерным размерам современных ветроустановок.

*Карты технического потенциала* должны отражать следующие расчетные величины: производительность типовых ветроустановок на принятых в настоящее время в ветровой энергетике высотах установки турбины; производительность типовых солнечных фотоэлектрических установок, эффективность работы солнечных водонагревательных установок (технический потенциал должен отражать средние значения указанных производительностей за определенный период, обычно – за год). Максимальные значения величин на картах целесообразно отражать яркими цветами для удобства определения пользователем территорий с оптимальными для использования техническим потенциалом. Так для солнечных коллекторов при выражении технического потенциала в виде доли покрытия нагрузки горячего водоснабжения (в процентах) значения менее 50% говорят о низком потенциале (то есть невозможности обеспечить нагрев воды до контрольного значения без использования резервного водонагревателя) [66]. Значения от 50 до 80% говорят о среднем потенциале территории, а выше 80% – о высоком потенциале использования водонагревательных установок на солнечной энергии.

Выделить пороговые значения при отображении на картах технического потенциала фотоэлектрических панелей сложнее. Опыт успешного использования таких установок в странах Европы со среднегодовым дневным поступлением солнечной радиации 4,7 кВтч/м<sup>2</sup>день (в Испании) и 3,3 кВтч/м<sup>2</sup>день (на юге Германии), может говорить о достаточно высоком потенциале солнечной энергии и в России. Возможные ограничения могут накладывать климатические особенности регионов с холодными зимами и периодами с условиями полярной ночи. Однако такие регионы часто характеризуются высоким коэффициентом прозрачности атмосферы, что повышает эффективность фотоэлектрических установок.

В качестве характеристики, позволяющей определить предельные (минимальные) значения технического потенциала ветровой энергии, в работе был выбран коэффициент использования установленной мощности ( $K_{\text{нум}}$ ). Эта характеристика определяет, какую долю энергии от максимально возможной может выработать ВЭУ данного типа в конкретной местности. Как указывалось выше в главе 2, при оценке фактической годовой производительности ВЭУ ( $E$ ) учитываются метеорологические условия местности, а именно, средняя многолетняя повторяемость скорости ветра  $n(v_i)$  и технические характеристики данного типа ВЭУ (мощностная характеристика).

При расчете максимально возможной производительности ВЭУ предполагается, что ветроустановка работает на своей максимальной (или номинальной, указанной в техническом паспорте) мощности в течение всего года, т.е.:

$$E_{\text{max}} = TP_{\text{ном}}$$

здесь  $T$  – количество часов в рассматриваемый временной период (чаще – год);  $P_{\text{ном}}$  – номинальная (максимальная) мощность установки.

Ясно, что в зависимости от ветрового режима местности, время, в течение которого ветроустановка с заданными техническими характеристиками работает с максимальной мощностью, может теоретически варьироваться от 0 до 8760 часов

(полный год). Соответственно  $K_{\text{нум}}$  изменяется от 0 до 100%. В настоящее время среднее значение  $K_{\text{нум}}$  для ВЭС, эксплуатируемых в Европейском Союзе составляет порядка 25-30%. При существующем уровне развития ветроэнергетики в РФ  $K_{\text{нум}}$  около 20% считается высоким и вполне приемлемым для использования энергии ветра. Если обсуждать перспективы развития ветроэнергетики, то в ЕС поставлена задача увеличить средний  $K_{\text{нум}}$  до 30-35% путем максимально эффективного использования природных ветровых ресурсов и совершенствования проектирования станций. Целый ряд работ, посвященных стратегии развития ветроэнергетики в России, также содержит обоснование значения  $K_{\text{нум}}=30\%$  как целевого показателя [39]. В связи с этим в данном исследовании были приняты следующие градации территорий по величине  $K_{\text{нум}}$ :

**0–15%** – низкий технический потенциал;

**15–25%** – средний (приемлемый) технический потенциал;

**25–30%** и выше – высокий технический потенциал.

По результатам анализа источников данных – как международных, так и российских климатических справочников, баз данных, текущей метеорологической и актинометрической информации, указанных в Главе 1, – видно, что основной проблемой картографирования ресурсов ветровой и солнечной энергии является недостаточная плотность пространственной сетки данных. Поэтому при составлении карт валового и технического потенциала солнечной и ветровой энергии предлагается использовать методы интерполяции. Подробнее специфика использования интерполяции для метеоданных будет обсуждаться в разделе 2.4.2.

**Третий блок карт – карты факторов и ограничений, влияющих на размещение объектов на ВИЭ** – должен отражать характеристики территории, влияющие на размещение объектов солнечной и ветровой энергетики (это могут быть как ограничивающие факторы, так и способствующие). Их можно подразделить на несколько основных групп: природные, экологические, технические, экономические и социальные. Основой для составления карт третьего блока должна быть

количественная и качественная информация, представленная в векторном или табличном формате.

Результатом совместного анализа третьего блока карт с картами второго блока являются комплексные карты перспективности территории и выявление районов, оптимальных для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики.

### *Состав и тематика картографического обеспечения*

Картографическое обеспечение оценок ресурсов ВИЭ фактически представляет собой базу пространственно ориентированной информации с визуализацией в виде серии электронных карт. Её масштабы, детализация и состав зависят во многом от назначения серии.

#### *Назначение серии карт ресурсов ВИЭ*

Серия карт предназначена для проведения комплексной оценки ресурсов солнечной и ветровой энергии на региональном уровне. Серия карт может быть использована местными органами государственной власти, а также проектными организациями для поиска оптимальных территорий и технико-экономического обоснования инвестиций. Использование нескольких карт позволяет избежать перегруженности карты и помогает комплексно подойти к оценке конкретного явления в целом.

При составлении карт необходимо руководствоваться общими требованиями и использовать:

- единый масштаб или кратные масштабы;
- единую картографическую проекцию (по возможности);
- единую базовую топографическую основу;
- согласующиеся легенды карт, шкалы, градации;
- единый уровень генерализации;
- данные на картах должны относиться к единому временному интервалу;
- единое оформление [17].

Помимо ресурсных характеристик на топографической основе карт ресурсов ВИЭ, валового и технического потенциала должны быть показаны административные границы (важность их

отображения определяется первостепенным назначением карт этого типа – а именно, проведением региональных оценок и прогнозов развития возобновляемой энергетики) и береговая линия (в случае, если субъект имеет выход к морю). Все границы следует разделять по цвету и способу отображения (толщиной и типом линий). На картах 3-го блока могут быть также отображены границы муниципальных образований и городских округов. Населенные пункты с числом жителей более 20 тысяч человек должны быть показаны пунсонами. Для ориентации по листу карты дополнительно могут быть показаны прочие населенные пункты. Приоритет следует отдавать городам, являющимся административными центрами муниципальных районов и городских округов. Также на географической основе должны присутствовать основные элементы гидрографической сети с подписями их названий (в данном случае не имеет смысла отображать малые реки, чтобы не перегружать карту). Дорожно-транспортная сеть отображается только на картах 3-его блока.

Региональный уровень исследования предполагает использование масштабного ряда мельче 1:1 000 000 (в зависимости от размера территории). Тем не менее, 3-ий блок карт может быть составлен для выбранной по результатам первичных оценок территории более крупного масштаба.

Территории сильно расчлененного рельефа на картах должны быть выделены штриховкой, т.к. здесь картографирование потенциалов солнечной и ветровой энергии при региональных оценках не может быть выполнено с достаточной достоверностью и требуют дополнительных исследований более крупного масштаба.

Временное согласование данных на картах 1-го и 2-го блока соблюдается за счет использования осредненных характеристик солнечной и ветровой энергии за одинаковые временные периоды. На картах 3-го блока, отражающих природные, социальные и экономические явления, необходимо стремиться к отображению соответствующих характеристик на единый момент времени или период, максимально близкий к настоящему времени. Однако это представляет некоторую сложность ввиду использования при составлении карт 3-го блока архивных данных. Экономические и

социальные явления в данном случае часто отражаются в виде динамики изменения показателей.

В качестве источников данных для 3-го блока следует использовать топографические карты государственных фондов, руководствуясь основными принципами диагностики территории [49].

*Состав блока карт природных ресурсов солнечной и ветровой энергии:*

1. средние скорости ветра на высотах 10 и 50 м (среднегодовые значения по данным всех доступных источников: наземные метеостанции, спутниковые данные, аэрологические данные, ветромониторинг);

2. повторяемость скоростей ветра;

3. суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность единичной площади (среднегодовые значения, летние месяцы, теплые полгода).

*Состав блока карт валового и технического потенциалов солнечной и ветровой энергии:*

1. энергия воздушной струи единичной площади сечения за год;

2. расчетная производительность энергии заданным типом ВЭУ;

3. суточные суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность единичной площади (среднегодовые значения, летние месяцы, теплые полгода)

4. суточные суммы суммарной солнечной радиации, на различно ориентированные поверхности единичной площади (среднегодовые значения, летние месяцы, теплые полгода);

5. годовые суммы прямой и суммарной солнечной радиации на следящие и ориентированные поверхности единичной площади;

6. корреляции валовых потенциалов солнечной и ветровой энергии (за год, по месяцам года);

7. энергетическая эффективность водонагревательных установок (за летние месяцы, теплые полгода);

8. расчетная годовая производительность фотоэлектрических модулей единичной площади с учетом угла их наклона.

Выше в разделах 2.1.1 и 2.2.1 были подробно рассмотрены и обобщены источники данных о характеристиках солнечной и ветровой энергии, а также особенности их получения. При составлении карт ресурсов и потенциалов ВИЭ следует руководствоваться следующими принципами отбора информации.

При *первичных оценках* потенциалов солнечной и ветровой энергии территории в целом допустимо опираться на специализированные базы данных (например, NASA POWER) и реанализы с верификацией этих данных по наземным метеорологическим и актинометрическим измерениям (если таковые ведутся в данном регионе) и с учетом разницы высот измерений для ветровых характеристик. При значительных расхождениях данных необходимо введение поправки в значения скорости и повторяемости скорости ветра, прихода солнечной радиации. Процедура введения таких поправок должна быть разработана и обоснована. В противном случае следует невязку с данными метеонаблюдений показывать как погрешность определения ветровых и солнечных показателей.

*Более точные обоснования* ветропотенциала могут быть проведены:

1) для точек (площадок), расположенных вблизи имеющихся метеостанций и актинометрических станций (с учетом разницы высот измерений скорости ветра и угла наклона приемной поверхности для солнечной радиации);

2) для точек (площадок) ветромониторинга с обязательным сопоставлением полученных в краткосрочных измерениях скоростей ветра с многолетними наблюдениями ближайшей метеорологической станции. Отклонения величин скорости ветра должны быть представлены в виде погрешности определения характеристик ветропотенциала (энергии воздушной струи или выработки энергии ветроустановкой заданного типа). Для определения характеристик солнечной радиации краткосрочный мониторинг не проводится.

В результате можно выстроить следующую иерархию данных по полноте и адекватности получаемых оценок потенциала солнечной и ветровой энергии территории (таблица 2.6)

Таблица 2.6

Иерархия данных для оценки ресурсов солнечной и ветровой энергии

Качество получаемых оценок	Перечень источников данных
Максимально полная оценка валового и технического потенциала территории	1) Данные ветромониторинга на площадках в пределах региона 2) Срочные или непрерывные данные метеостанций и актинометрических станций, максимально приближенных к рассматриваемой точке или площадке 3) Специализированные базы данных; реанализы скорости ветра и прихода суммарной солнечной радиации
Промежуточный уровень оценки	1) Данные метеостанций и актинометрических станций региона с максимально доступной детализацией данных по времени 2) Специализированные базы данных и реанализы
Наиболее общая оценка	Специализированные базы данных и реанализы

### *Особенности интерполяции характеристик ветровой и солнечной энергии*

Важной проблемой при создании карт природных ресурсов, валового и технического потенциалов ветровой и солнечной энергии является обоснованность интерполяции метеоданных, которые, как правило, имеют точечную привязку и нелинейные характер распространения по территории.

В метеорологии используются детерминированные и геостатистические методы интерполяции, а также смешанные методы, сочетающие в себе два вышеупомянутых типа. Один из значимых факторов при выборе метода интерполяции – временной диапазон отображаемых данных. Так по Твейто О.Е. [135] ежемесячные или сезонные карты должны быть основаны на

интерполяции аномалий или нормированных значений, а ежедневные – на интерполяции абсолютных значений. Особую сложность представляет отображение данных многолетних измерений из-за возможных изменений в измерительной сети и необходимости обновления результатов статистической обработки при поступлении в массив данных новых измерений. Отдельно следует рассматривать задачу интерполяции метеоданных в горных районах, где даже при наличии наземной измерительной сети, большая часть метеостанций находится в долинах, и, тем самым, общий массив данных не представляет собой объективную реальность.

Рассмотрим области и возможности применения к метеоданным наиболее известных методов интерполяции. Метод треугольной нерегулярной сети (TIN) и метод естественного соседа (Natural Neighbor) применяются к характеристикам ветровой и солнечной энергии достаточно редко и эффективны только при высокой плотности сети измерений. Гораздо более широко используется при работе с метеоданными метод обратно взвешенных расстояний (IDW), за счет того, что он учитывает возможную анизотропию данных. Метод IDW широко используется в метеорологии. Примерами является интерполяция метеорологических аномалий метеослужбой Германии в работах по проекту REGNIE (REGionalisierung räumlicher NIEDerschlagsverteilungen) [105], а также при генерации ежемесячных наборов данных для сетки разрешением 5 км по 36 параметрам метеослужбой Великобритании [127]. В Португалии IDW используется для интерполяции температуры между 84 метеорологическими станциями; в Испании – для создания ежемесячных карт климатических аномалий температуры, осадков и инсоляции.

Метод сплайна считается достоверным при интерполяции ежемесячных и ежегодных метеорологических элементов, но менее пригоден на более высоких временных разрешениях, таких как дни и часы. Использование геостатистического анализа различными типами метода кригинга часто и эффективно используется при интерполяции температур, но ограничено плотностью измерительной сети. При недостаточно высокой плотности целесообразнее использовать метод IDW или комбинацию методов.

Известны также методы интерполяции для метеоданных, такие как MISH (Meteorological interpolation based on Surface Homogenized Data Basis) (разработан и использовался только в Венгрии) [134], PRISM (разработан в Университете Орегона, США). Использование последнего при климатическом картографировании на федеральном уровне США [162] и для горных альпийских территорий в Европе [130] показало хорошие результаты для территорий с сильным расчленением рельефа. Однако для равнинных территорий с плотной измерительной сетью более эффективны классические методы.

Все описанные методы интерполяции достаточно широко представлены в современных геоинформационных продуктах. Наиболее известными инструментами с максимальным набором методов интерполяции для картографирования ресурсов ветровой и солнечной энергии являются продукты ArcGIS [161] и Generic Mapping Tools (GMT) [137].

Таким образом, выбор метода интерполяции при создании карт ресурсов солнечной и ветровой энергии определяется плотностью пространственного распределения исходных данных, проекцией карт, характером рельефа, требованиям к сглаживанию (в большинстве случаев сглаживание необходимо и позволяет избежать ошибок, а также оптимально при визуальном восприятии карт). В этой связи использование для картографирования данных пространственного метеорологического моделирования значительно упрощает задачу определения оптимальных методов интерполяции, поскольку такие данные представлены на более плотной и равномерной пространственной сетке (в отличие от данных наземных метеостанций) и получены с учетом типа подстилающей поверхности.

Согласно проведенному сравнительному анализу для территории Юга России при интерполяции характеристик ветровой энергии наилучшие результаты дал метод IDW с весом 2. Более высокие значения веса приводят к потере некоторых значений за счет сглаживания и не приемлемы. Для характеристик солнечной энергии оптимальные результаты показал метод сплайна.

### *Картографирование факторов, влияющих на размещение объектов солнечной и ветровой энергетики*

Основной целью создания карт факторов является определение оптимальных территорий для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики. Для этого в первую очередь необходима типизация факторов, влияющих на принятие решения о размещении энергоустановки на заданной территории. Авторами были выделены следующие типы факторов: природные, экологические, технические, экономические и социальные (рис. 2.7). После их группировки и составления серии карт возможен анализ территории и определение наиболее перспективных площадок для проектирования объектов на ВИЭ.

#### *Природные факторы*

Природные условия территории является важными ограничениями при проектировании установок на ВИЭ. Одним из первых по значимости ограничивающих факторов при размещении объектов солнечной и ветровой энергетики является **рельеф**. Влияние этого фактора может сказываться на величине природного ресурса (например, вследствие формирования зоны тени как для солнечной радиации, так и для ветра), на формировании опасных инженерно-геологических процессов. Этот фактор может также определять эстетическую ценность территории, нарушение которой недопустимо.

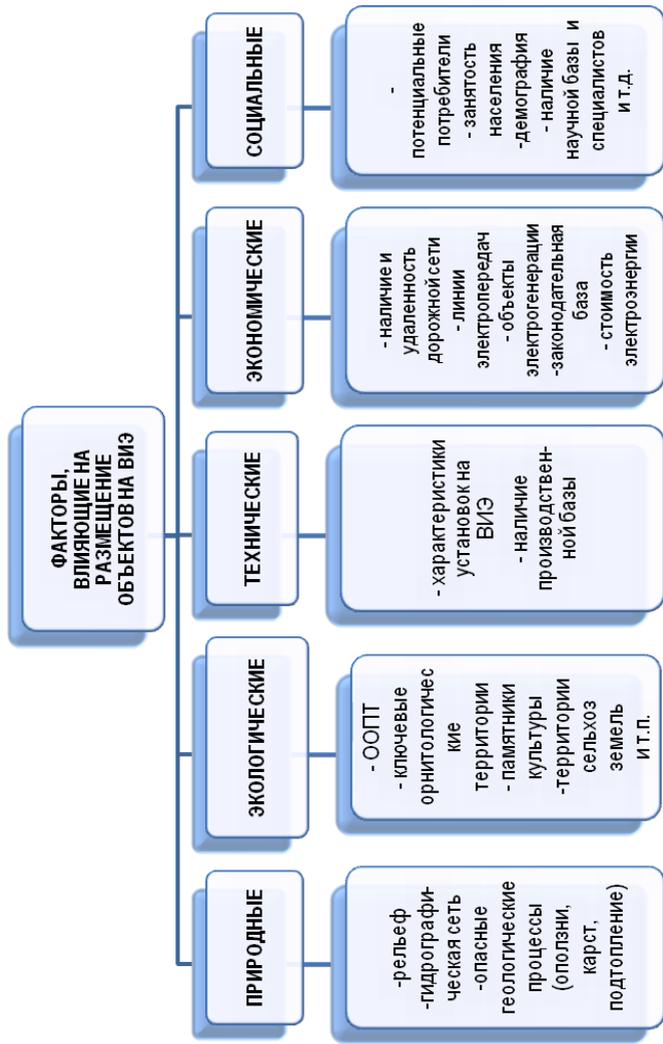


Рис. 2.7. Типизация факторов, влияющих на размещение объектов на ВИЭ.

Учитывая, что солнечные фотоэлектрические системы можно устанавливать на склоны практически любой экспозиции, ориентируя их по азимуту и углу, при картографировании максимальный валовый или технический потенциал, который возможно получить с площадки, если она находится на склоне с минимумом поступления солнечной радиации, может быть приравнено к максимальному по территории. При этом солнечные батареи нельзя устанавливать у подножия склонов, где они будут находиться в тени [30].

В вероэнергетике рельеф (особенно горный, сильно расчлененный) значительно влияет на ветровой режим. С позиций картографии масштаб региональных исследований (от 1:2 500 000 и мельче) подразумевает отображение на картах элементов макрорельефа и мегарельефа [81]. Таким образом на картах потенциала солнечной и ветровой энергии регионов целесообразно отражать только крупные формы сильно расчлененного рельефа (горные массивы, склоны).

Использование реанализов и специализированных баз данных при составлении карт валового и технического потенциала ветровой и солнечной энергии позволяет при региональных оценках учитывать влияние крупных форм рельефа и характера подстилающей поверхности (тип растительного покрова, снег, водная поверхность). Во избежание ошибок и пробелов в моделях на основе спутниковых наблюдений, производится корреляция данных с наземными измерениями. В настоящий момент существует две стратегии корреляции в GMAO. Автономная корреляция предполагает использовать в основе модель земной поверхности (без модели атмосферы) и обновляет метеоданные при обновлении условий земной поверхности. Второй способ корреляции учитывает атмосферный анализ (интеграция системы земля-атмосфера). Модель GMAO основана на фильтре Калмана (EnKF) и подходе Монте-Карло к нелинейной задаче фильтрации, которые хорошо подходят для нелинейных процессов и процессов прерывистого характера (таких как характеристики ветровой энергии). В тоже время, модели, используемые, например при создании базы данных NASA POWER, не обеспечивают высокую корреляцию с наземными данными в районах с

сильно расчлененным рельефом. Считается, что данные по солнечной и ветровой энергии для горных районов следует использовать с большой осторожностью.

**Гидрографическая сеть** на картах ресурсов и потенциалов ВИЭ является строгим ограничивающим фактором. Она должна включать в себя речную сеть, каналы, озера, болота, водохранилища, водоохранные зоны, соответствующие масштабу и уровню генерализации. Таким образом, при региональных оценках влияния гидрологических факторов на размещение объектов ВИЭ следует учитывать – помимо собственно водных объектов, – водоохранную зону вокруг них, размеры которой определяются Водным кодексом. Согласно Водному кодексу РФ [24], в границах водоохранных зон запрещаются все виды сельскохозяйственной деятельности (кроме сенокосов), а также движение и стоянка транспортных средств (что необходимо для строительства и обслуживания объектов возобновляемой энергетики). В различных регионах России применимость Водного кодекса может значительно отличаться, что определяется большой неоднородностью географических, климатических условий и связанных с ними основных видов хозяйственной деятельности.

**Опасные геологические процессы** при проектировании объектов солнечной и ветровой энергетики следует учитывать так же, как и при проектировании иных инженерных сооружений. При региональных оценках оптимальным могло бы быть использование имеющегося инженерно-геологического районирования территории, проводимого специализированными организациями и основанного на данных о геологическом строении региона, анализе свойств грунтов и мониторинге таких процессов, как оползни, сели, абразия. При отсутствии данных инженерно-геологического районирования на картах факторов необходимо отображать в первую очередь зоны распространения карста, карстовых воронок, суффозии, зоны возможного подтопления, зоны распространения опасных склоновых процессов (где возможны сдвиги и обрушения грунта под воздействием гидрометеорологических явлений), зоны распространения сейсмических

процессов, абразионные и эрозионные процессы речных долин, просадки в лессовых и пепловых породах [82].

В северных регионах следует также отдельно рассматривать зоны распространения вечной мерзлоты и связанные с нею опасные инженерно-геологические процессы, а также уровень снежного покрова, катастрофические ветра, обледенение и т.д.

### *Экологические факторы*

**Особо охраняемые природные территории**, зачастую имеющие значительные размеры, при оценках на региональном уровне являются одним из наиболее серьезных ограничений размещения объектов возобновляемой энергетики. Однако в последние годы установки на ВИЭ всё чаще используются для решения вопросов энергообеспечения на территориях с максимально строгими запретами хозяйственной деятельности [39]. Здесь важным становится масштаб проектируемых установок и изолированность территории от источников энергоснабжения. Именно в изолированных территориях при использовании ВИЭ положительный экологический эффект от них может превышать возможное негативное воздействие на окружающую среду.

При региональном масштабе исследований важно учитывать интересы потребителя конечной картографической продукции, а именно, органы государственного управления, занимающиеся энергетической стратегией региона, инвестиционные компании, планирующие реализацию проектов возобновляемой энергетики мегаваттного класса. В этом случае необходимо отображать на картах все типы ООПТ, разделяя их по уровню ограничения хозяйственной деятельности. Для России это государственные природные заповедники, национальные парки, природные парки, государственные природные заказники, памятники природы, дендрологические парки и ботанические сады.

Для ветроэнергетики особо важным является учет воздействия планируемых объектов на орнитофауну. Поэтому на картах ресурсов ветровой энергии необходимо отражать **ключевые**

### **орнитологические территории (КОТР) и пути миграции птиц.**

Ключевые орнитологические территории выделяются на основании специальных критериев, разработанных координационным центром программы КОТР в соответствии с требованиями Международной ассоциации охраны птиц (Bird Life International). Первоочередное внимание в этих требованиях уделено редким, сокращающим численность или образующим крупные скопления (и, следовательно, уязвимым) видам птиц. В основе большинства критериев - четкие количественные пороги численности. Значимой для вида или популяции принято считать потерю 1% численности. КОТР выделяется также в том случае, если на данной территории концентрируется не менее 20 тыс. водоплавающих или околоводных птиц. В случае видов, находящихся в критическом состоянии, для выделения КОТР международного значения бывает достаточно лишь регулярное присутствие данного вида на территории. Эти величины и использовались при расчете большинства порогов численности, на которых основано выделение КОТР России. Необходимо подчеркнуть, что КОТР не всегда представляют собой только участки ненарушенной или слабо нарушенной природы. В качестве КОТР нередко выступают участки антропогенного ландшафта – рыбопродуктивные пруды, обводненные карьеры торфоразработок, водохранилища, искусственные лесонасаждения в безлесных районах и т.п. Причем видовое разнообразие и численность птиц на таких антропогенных КОТР могут быть столь же значительно, как и в наиболее богатых природных местообитаниях [43].

Ограничением для реализации проектов ВЭ также является расположение **объектов исторического и культурного наследия, археологических памятников**, на территориях которых возможно сооружение лишь малогабаритных установок, не влияющих на внешний облик памятника, и при условии детального обоснования положительных и отрицательных сторон проекта. Кроме того в регионах, обладающих уникальными природными и рекреационными ресурсами могут быть рекомендованы оценки эстетической, туристической и рекреационной ценности территории [29].

Отдельно следует рассмотреть ограничения по типам **землепользования**. Крупные ВЭС и солнечные электростанции (СЭС) не могут быть размещены в населенных пунктах, однако на их территориях возможно использование единичных малых установок. Что касается сооружения таких энергообъектов на землях сельскохозяйственного назначения, следует учитывать, что СЭС создают затенение и не совместимы с сельским хозяйством. Однако, ВЭУ занимают только 1 % от всей территории используемой ветропарком, а фундамент ветроустановки находится полностью под землей. Таким образом, земли под ветропарками могут не изыматься из сельскохозяйственного использования.

#### *Технические факторы*

По действующим в России государственным стандартам в области нетрадиционной энергетики [31], проектирование ветроустановок ограничивается: 1) уровнем звука (не более 60 дБА) на расстоянии 50 м от ВЭУ на высоте 1,5 м от поверхности земли, 2) уровнем звука в жилых и общественных помещениях, находящихся вблизи ветроустановок (уровень звука должен быть не выше 60 дБА, уровень инфразвука не выше 100 дБА). Результаты исследований, проведенных немецкой инжиниринговой фирмой CUBE близ посёлка Мирный Краснодарского края [79] (данная фирма занимается оценкой технологической и экономической эффективности проектов в области ветроэнергетики) показали, что шум, производимый 10-ю ВЭУ, на расстоянии 350 метров сравним с фоновыми шумами в сельских районах в ночное время (табл. 2.7). Таким образом, при региональных оценках и картографировании целесообразно рассматривать ограничение по **шумовому эффекту** от ВЭС как буферную зону вокруг населенных пунктов, составляющую не менее 300 м.

Таблица 2.7

Сравнительная оценка уровня шума от различных источников  
(по [79])

Источники шума	Уровень звукового давления, дБА
Реактивный самолет – на расстоянии 250м	105
Шум в оживленном офисе	60
Автомобиль, движущийся со скоростью 64 км/ч (на расстоянии 100м)	55
Ветровая электростанция (10 турбин) (расстояние 350м)	35...45
Тихая спальня	35
Фоновый шум в сельском районе ночью	20...40

Одной из технических особенностей эксплуатации установок на солнечной энергии является создание локального **теплового эффекта** (незначительное повышение температуры воздуха). Однако учитывать этот фактор при региональных оценках не представляется целесообразным.

В целом для установок, работающих на солнечной и ветровой энергии в России, актуальна проблема отсутствия нормативов, регламентирующих их производство, эксплуатацию и утилизацию. Проведенный авторами анализ показал, что в РФ на сегодняшний день отсутствуют ГОСТы, которые могли бы стать источником информации о факторах, ограничивающих размещение объектов солнечной энергетики. По оценкам экспертов [78], нехватка таких стандартов наблюдается и в тех странах, где возобновляемая энергетика развивается давно и успешно. Без регламентированной общепринятой основы процесс многокритериального анализа сложно автоматизировать – в любом случае на всех этапах проведения такого анализа необходимы экспертные оценки. При разработке стандартов соответствующие ограничивающие факторы должны быть включены в рассмотрение.

### *Социально-экономические факторы*

Одним из приоритетных вопросов в возобновляемой энергетике является определение социальных и экономических факторов, влияющих на развитие ВЭ в регионе и определяющих последствия строительства объектов на ВИЭ. К ним могут относиться такие характеристики как улучшение условий жизни населения, обеспечение надежного гарантированного доступа к электроснабжению для сельских и отдаленных районов, создание новых рабочих мест. Целесообразность сооружения солнечных установок для энергообеспечения медицинских и учебных центров в развивающихся странах зачастую определяется только их социальной значимостью. Важных успехов в этой области достигли отдельные страны Латинской Америки, Африки, Азии, значительно расширив мощность установок на ВИЭ в сельских районах. Такой вид электрификации приближает выработку электроэнергии к потребителям, позволяет избегать строительства протяженных ЛЭП и сокращает потери в сетях. Кроме того развитие возобновляемой энергетике приводит к созданию новых рабочих мест и повышению уровня образования населения [55].

Экономическими стимулами использования ВИЭ могут послужить их конкурентоспособность с традиционными видами топлива, обеспечение независимости от импорта энергоносителей в случае энергодефицитности региона, сохранение местных запасов органического топлива для последующего экспорта. Также возможен коммерческий эффект на локальном уровне, определяющийся привлекательностью новых объектов, использующих инновационные экологически чистые технологии, для населения. Данный фактор особенно важен в жилищном строительстве, гостиничном бизнесе и т.п.

В России до недавнего времени социальные факторы не являлись решающими в определении стратегии развития возобновляемой энергетике в регионах. Но в последние годы была сформирована законодательная база [71], а также реализован целый ряд проектов распределенной генерации на возобновляемых источниках, которые безусловно имели социально-экономическое значение. В качестве

одного из примеров можно привести энергообеспечение рыбацких поселков Пялица, Чаванга, Тетрино и Чалома комплексными солнцеветро-дизельными установками в рамках региональной программы энергосбережения Мурманской области в 2014-2015 гг. [76]. Этот проект стал муниципальной инициативой, которая была поддержана и профинансирована на региональном уровне. Установки солнечной и ветровой генерации с дизель-генераторами в качестве дублирующей мощности, созданные в поселках Якутии, Алтая, Ямала и др., позволили обеспечить комфортные условия проживания людей в удаленных от единой энергосистемы населенных пунктах. Таким образом, к социальным факторам следует в первую очередь отнести наличие потребителей энергии ВИЭ при недоступности электроснабжения от централизованной сети и конкурентоспособностью энергии от ВИЭ по сравнению с другими источниками.

Таким образом, в состав блока карт факторов, ограничений и предпосылок, влияющих на размещение объектов на ВИЭ, следует включать:

1. особо охраняемые территории (в том числе, ключевые орнитологические территории, лесной фонд, земли обороны и безопасности, территории памятников природы и культуры);
2. земельные ресурсы;
3. население (число, плотность, динамика);
4. опасные природные явления;
5. транспортно-дорожная сеть;
6. генерирующие объекты традиционной энергетики и возобновляемой энергетики;
7. энергопотребление;
8. районирование территории по перспективности размещения на ней объектов возобновляемой энергетики – итоговая карта, получаемая в результате совместного анализа вышеупомянутых карт и районирования территории по степени пригодности.

Следует отметить, что тематика карт блока факторов может изменяться и дополняться в зависимости от физико-географических,

социальных, экономических особенностей региона. Тем не менее, общий принцип последовательного анализа максимально возможного (по доступности и актуальности данных) набора факторов целесообразен и необходим.

Рекомендации по размещению объектов солнечной и ветровой энергии основываются на ранжировании всех выявленных факторов и совмещении содержащих их электронных слоев с использованием ГИС-технологии оверлея. В этом случае выбор перспективных площадок основывается на результатах анализа комплекса факторов и выражается в виде типов ограничений на размещение установок. Последовательность выполнения такого анализа представлена на рисунке 2.8. В результате анализа вышеупомянутых факторов выделяются три критерия или три уровня ограничения размещения объектов. Ограничивающие критерии, которые максимально влияют на решение о размещении объектов возобновляемой энергетики, отображаются нанесением объектов (например, населенные пункты, ООПТ, памятники истории и т.п.) или их свойств на карту. Также они могут быть выражены границами буферной зоны объектов. Целесообразно определить следующие уровни ограничений (или типы критериев):

- **строгое ограничение** – строительство объектов ВЭ полностью запрещено;

- **среднее ограничение** – строительство теоретически запрещено, но может быть выполнено, если положительное воздействие объекта будет достаточно высоко;

- **слабое ограничение** – строительство может быть осуществлено после более детальной оценки воздействия объекта на окружающую среду.



Рис. 2.8. Структурированный подход к решению задачи поиска оптимальных территорий для размещения объектов на ВИЭ

Таким образом, создание карты перспективности территории включает в себя стадию объединения критериев по уровню ограничения, а затем стадию присвоения каждому элементу карты наибольшего ограничения в этой точке и добавления штриховкой уровня имеющихся предпосылок к развитию ВЭ (если элемент не содержит в себе строгое ограничение). В базе пространственных данных также могут содержаться промежуточные карты, которые могут показывать количество критериев каждого уровня ограничения в каждом элементе или площадь элементов для каждого уровня

ограничений. Такие карты предоставляют пользователям возможность рассмотрения отдельных территории для дальнейшего анализа или полное ее исключение.

Следует отметить, что конечное районирование территории необходимо проводить отдельно для объектов различного масштаба: для крупных ветро- и солнечных станций мегаваттного класса и для единичных установок. Возможно также рассматривать отдельно сетевые и автономные установки.

### **Глава 3. Апробация методов оценки и картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии на примере территории Юга России**

Апробация описанной в главе 2 методики региональной оценки ресурсов возобновляемой энергетики проводилась для территории Юга России. Территория исследования включала в себя Южный федеральный округ (ЮФО) и Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО) РФ. В силу того, что апробация методики проводилась на протяжении ряда лет (с 2014 по 2019 гг.), отдельные карты в приложениях не отражают современный состав указанных федеральных округов, в частности, не включают в себя территорию Республики Крым. Более детальные исследования ресурсной базы ВИЭ Крыма можно найти в работах, выполненных в рамках проекта РФФИ 16-05-01015\16 «Разработка научных подходов и апробация методов оценки и картографирования потенциала возобновляемых источников энергии на региональном уровне (на примере территории Крымского полуострова)».

По своим природным, экономическим, социальным и экологическим характеристикам исследуемый регион обладает необходимыми предпосылками для использования возобновляемых источников энергии. Физико-географические условия позволяют говорить о значительном потенциале солнечной и ветровой энергии. Так, продолжительность солнечного сияния составляет 2000-2400 часов в год. Значительные территории на побережьях Азовского и Черного морей, а также в горных районах имеют среднегодовые значения скоростей ветра выше 5 м/с, что определяет технические возможности использования ветровой энергии.

Кроме того регионы Юга России характеризуются достаточно высокими темпами роста экономического сектора, особенно сельского хозяйства, вводом значительного объема жилья, развитием инфраструктуры, реконструкцией и вводом в эксплуатацию ранее построенных объектов различного назначения. Это не только

обуславливает постоянный рост потребления энергии, но и увеличение количества органических отходов (сельскохозяйственного, промышленного производства, твердых коммунальных отходов), которые являются ресурсной базой для биоэнергетики.

Энергоснабжение потребителей на территории обеспечивает Объединённая энергосистема Юга России (ОЭС Юга). Структура установленной мощности электростанций приведена в таблице 3.1

Таблица 3.1

Структура установленной мощности электростанций ОЭС Юга России  
на 01.01.2019

<b>ОЭС Юга</b>	<b>Установленная мощность, МВт</b>	<b>Доля от общей установленной мощности, %</b>	<b>Коэффициент использования установленной мощности</b>
ТЭС	13 025,8	55,34	49,87
ГЭС	5 942,8	25,25	42,31
АЭС	4 030,3	17,13	84,71
ВЭС	92,0	0,39	15,54
СЭС	445,0	1,89	15,42
Итого	23 535,9	100	

В состав ОЭС Юга на 08.07.2019 г. входят 14 региональных энергосистем: Астраханская, Волгоградская, Ростовская, Краснодарская, Ставропольская, Карачаево-Черкесская, Кабардино-

Балкарская, Северо-Осетинская, Чеченская, Дагестанская, Калмыцкая, Ингушская, Республики Крым и г.Севастополь (Таблица 3.2).

Таблица 3.2

Основные показатели работы ОЭС Юга России в 2018 году [62]

<b>Показатель</b>	<b>ОЭС Юга</b>
Установленная мощность на 31.12.2018, МВт	23 535,9
± к 01.01.2018, %	+9,3
Располагаемая мощность электростанций на годовой максимум потребления мощности 2018 года, МВт	21 861
± к 2017 году, %	+9,3
Нагрузка электростанций на годовой максимум потребления мощности 2018 года, МВт	15 060
± к 2017 году, %	+9,8
Выработка электроэнергии в 2018 году, млрд кВтч	104,7
± к 2017 году, %	+4,7
Потребление электроэнергии в 2018 году, млрд кВтч	102,3
± к 2017 году, %	+3,2

Видно, что в целом по территории как потребление, так и производство энергии растет. За 2018 год в ОЭС Юга России введено 1 939,9 МВт мощности, что сравнительно с остальными энергосистемами России является наиболее крупным увеличением мощности за этот период.

Динамика производства и потребления электрической энергии по региональным энергосистемам ОЭС Юга существенно различается (таблица 3.3).

Таблица 3.3

Фактические годовые объемы потребления электроэнергии в региональных энергосистемах ОЭС Юга за 2017–2018 гг. [62]

Наименование региональной энергосистемы	Потребление электроэнергии, млн кВтч			
	2017	2018	Отклонение (+/-) к 2017	% к 2017
Астраханской области	4371,3	4424,4	53,1	1,22
Волгоградской области	15499,7	16496,2	996,5	6,43
Республики Дагестан	6504,0	6487,7	-16,3	-0,25
Республики Ингушетия	734,1	768,6	34,4	4,69
Кабардино-Балкарской Республики	1691,0	1675,9	-15,1	-0,90
Республика Калмыкия	620,4	763,6	143,3	23,10
Карачаево-Черкесской Республики	1409,4	1354,3	-55,1	-3,91
Республики Адыгея и Краснодарского края	26989,0	27708,4	719,4	2,67
Ростовской области	18570,4	19362,7	792,3	4,27
Республики Северная Осетия – Алания	2132,2	2049,9	-82,3	-3,86
Ставропольского края	10429,8	10594,3	164,5	1,58
Чеченской Республики	2699,5	2862,8	163,3	6,05
Республики Крым и г. Севастополя	7442,7	7732,2	289,5	3,89

Наиболее высокие темпы роста потребления ЭЭ за 2017–2018 гг. были отмечены в региональных энергосистемах Республики Калмыкия (23,1%), Волгоградской области (6,43%), Чеченской Республики (6,05), Ростовской области (4,27%) и др.

При анализе положительной динамики потребления следует отметить рост в течение всего 2018 года электропотребления на предприятии «Волгоградский алюминиевый завод (АО «СУАЛ»)). В связи с увеличением объема производства электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях Юга России происходило увеличение расхода электроэнергии на собственные нужды этих электростанций. Для АЭС это было в значительной мере связано с вводом в 2018 году нового энергоблока № 4 на Ростовской АЭС. Среди промышленных предприятий нефтепроводного транспорта, увеличивших в 2018 году годовые объемы потребления электроэнергии, следует отметить: АО «КТК-Р» (Каспийский трубопроводный консорциум), физически связанный с энергосистемами Астраханской области и Республики Калмыкия. Кроме того рост энергопотребления в ОЭС Юга России происходил и в связи с изменениями средних температур и влажности воздуха: увеличением температуры воздуха в летние месяцы и низкими температурами в отдельные годы в весенний период.

В структуре электропотребления ОЭС Юга доминирующее положение занимает добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, электроснабжение, теплоснабжение, кондиционирование воздуха, сбор и утилизация отходов. Доля этих отраслей вместе со строительной отраслью составляет 38% от суммарного электропотребления по объединению (данные Росстата на 2018 г. [61]). Промышленное электропотребление имеет наибольший удельный вес в электропотреблении энергосистем Волгоградской, Краснодарской, Ставропольской, Ростовской, Астраханской областей, Республик Крым, Карачаево-Черкесской и Северной Осетии-Алании. Доля сельскохозяйственного производства в общем электропотреблении ОЭС Юга составляет около 3%. Из них почти 37% электропотребления на производственные нужды сельского хозяйства в ОЭС приходится на

Краснодарскую энергосистему, в которой удельный вес этого сектора в суммарном потреблении ЭЭ составляет 4%.

Электропотребление транспортом в настоящее время в ОЭС Юга составляет 6% от суммарного электропотребления объединения. Около 45% электропотребления транспортом – это железнодорожный транспорт, доля электропотребления на электротягу в котором составляет 80%. 27% электропотребления транспортом в ОЭС Юга составляют магистральные нефте- и газопроводы, большая часть которых проходит по территориям Астраханской и Волгоградской областей и Краснодарского края.

Электропотребление городским и сельским населением составляет 24%. Наиболее высокую долю в суммарном электропотреблении энергосистем нужды населения занимают в Дагестанской (43,1 %), Калмыцкой (34,7 %), Ингушской (36,8%), Крымской (с г. Севастополем, 33%) энергосистемах.

По состоянию на 31.12.2018 ОЭС Юга в целом не является дефицитной. На территории ОЭС имеются избыточные энергосистемы: Волгоградская область, Ростовская область, Ставропольский край. Однако, наряду с этим на территории Юга России достаточно много энергодефицитных регионов. Наибольший дефицит наблюдается в Республиках Адыгея, Калмыкия, Северная Осетия-Алания, Краснодарском крае, г. Севастополе, Кабардино-Балкарской и Чеченской республиках. Ингушская энергосистема не имеет собственных генерирующих источников и полностью покрывают свою потребность в электроэнергии из других энергосистем. Покрытие энергодефицита мощностей производится не только за счет перетоков внутри ОЭС Юга, но и за счет энергосистем Средней Волги и Азербайджана (рисунок 3.1)

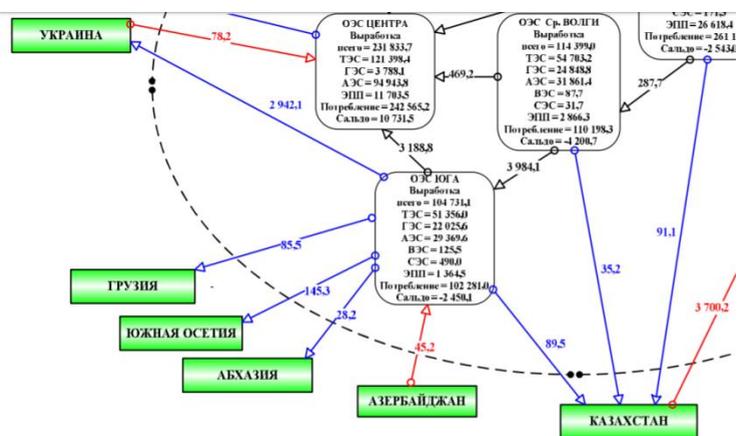


Рис. 3.1. Фрагмент схемы фактического баланса электроэнергии в ЕЭС России в 2018 году (по данным СО ЕЭС [62])

К 2022 году объем спроса на электрическую энергию в ОЭС Юга (согласно «Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году» [62]) прогнозируется на уровне 102,497 млрд кВтч. Среднегодовой темп прироста за период – 2,22 %, что в 2,7 раза выше среднего по ЕЭС России. Это в значительной степени связано с приростом потребления электрической энергии в ОЭС Юга за счет присоединения с 2017 года энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь. Без учета присоединения Крымской энергосистемы величина спроса на электрическую энергию оценивается в объеме 94,422 млрд кВтч со среднегодовым приростом выше среднего по ЕЭС России в 1,3 раза. Доля ОЭС Юга в общем объеме потребления электрической энергии ЕЭС России увеличится к концу прогнозного периода до 9,6 % с учетом Крымской энергосистемы.

Преобладающая часть прогнозируемого прироста (более 75 %) будет формироваться за счет ожидаемого увеличения потребления электрической энергии на существующих и новых крупных промышленных и транспортных предприятиях. К дополнительному увеличению прогнозного спроса на электрическую энергию приводит реализация проектов по развитию портовых комплексов и транспортной инфраструктуры на территории энерго-

системы, интенсивное жилищное строительство в Краснодаре, Сочи и Майкопе, рост потребления электрической энергии в домашних хозяйствах. Расширение и реконструкция действующих гостиничных и курортно-оздоровительных комплексов также будут способствовать дальнейшему росту спроса на электрическую энергию в сфере услуг.

Существенная часть прогнозируемого прироста потребления электрической энергии в ОЭС Юга формируется за счет присоединения с 2017 года энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь, объем потребления электрической энергии по которой оценивается на уровне 2022 года в размере 8,075 млрд кВтч. С окончанием переходного периода прогнозная динамика спроса на электрическую энергию в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополь прогнозируется стабильно положительной. Рост потребления электрической энергии в Крыму в первую очередь будет определяться развитием санаторно-курортного, туристско-гостиничного и агропромышленного комплекса.

Анализ функционирования ОЭС Юга показывает, что, несмотря на введение новых крупных энергообъектов и компенсации энергодефицита региона в целом, отдельные субъекты всё еще остаются полностью или частично дотационными в сфере энергетики. Интенсивный рост электропотребления в последние годы в ряде районов Краснодарской и Ростовской энергосистем обостряет проблемы в электроснабжении потребителей. Для повышения надежности энергоснабжения, наряду с развитием электрических сетей, вводятся новые энергоблоки на АЭС, а также реконструируются ГРЭС и ТЭЦ с увеличением их мощности и эффективности за счет использования современных парогазовых и газотурбинных технологий, котлов с циркулирующим кипящим слоем и т.п. В то же время в ОЭС Юга России – помимо использования традиционных технологий – имеются ниши и для использования возобновляемых источников энергии. Одним из наиболее существенных факторов развития возобновляемой энергетики на территории Юга России является необходимость снижения негативного воздействия на окружающую среду от традиционных технологий производства энергии. Тем более, что важным условием развития исследуемой территории является использование и сохранение ее туристско-рекреационного потенциала.

Значительно способствует развитию ВЭ в регионе меры государственной поддержки возобновляемой энергетики. Так, в 2007г. были приняты поправки к федеральному закону № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», которые впервые зафиксировали основные положения системы законодательной поддержки развития ВЭ в России. В постановлении Правительства РФ №449 от 28 мая 2013 г. были определены меры стимулирования использования возобновляемых источников энергии, а именно, обеспечение окупаемости инвестиционных проектов возобновляемой энергии путем продажи мощности на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) с заключением договора поставки мощности (ДПМ). При этом договор поставки мощности заключается на срок 15 лет, а государство фактически обязывает потребителей приобретать мощность станций на ВИЭ по цене, определенной законодательно. За счет незначительной доли возобновляемых источников в энергобалансе РФ, дополнительная нагрузка на потребителя оказывается несущественной. В 2019 году были приняты распоряжения Правительства РФ, призванные стимулировать развитие микрогенерации с использованием ВИЭ (Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года» и Проект Федерального закона N 581324-7 "О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации" (ред., принятая ГД ФС РФ в I чтении 06.02.2019)). И если постановление Правительства № 449 определило правила на рынке сетевой электрогенерации, то принятые меры поддержки микрогенерации должны сформировать рынок частных генераторов малой мощности (домохозяйств и их объединений, мелких предприятий) и т.д.

В этой связи для определения перспектив использования ВИЭ в регионе важным представляется детальный анализ ресурсов возобновляемых источников энергии. Результаты оценок ресурсов с уточнением их при осуществлении предпроектных изысканий позволяют давать более точные прогнозы по выработке энергии, а значит, достоверно обосновывать инвестиции и переходить к разработке рабочего проекта станций на ВИЭ.

### **3.1. Ресурсы и потенциалы биоэнергетики территории Юга России**

Южные регионы России являются крупнейшими производителями сельскохозяйственной продукции. Высокий уровень агропромышленного производства сопровождается значительным объёмом органических отходов – как растениеводства, так и животноводства. Большая плотность населения и значительный рекреационный потенциал этих территорий определяют актуальность проблемы утилизации отходов. На Юге России использование биомассы отходов для производства энергии может быть решением как экологических, так и энергетических проблем. При принятии решений относительно методов утилизации органических отходов требуется комплексный анализ территории с точки зрения объемов и режима образования органических отходов и их энергетического потенциала, объемов и режима энергопотребления, а также факторов (экологических, социальных и др.), ограничивающих создание объектов биоэнергетики. Далее будут приведены результаты оценки валового и технического потенциалов основных видов отходов растениеводства Краснодарского края, Волгоградской области, Республик Крым и Дагестан, а также отходов животноводства для Волгоградской области и Республики Крым.

#### ***Отходы растениеводства***

Базовой отраслью растениеводства указанных регионов, так же как и всего сельского хозяйства страны, является производство зерна. Зерновые культуры выращиваются во всех перечисленных выше субъектах Юга России; на их долю приходится более 50% всей посевной площади. Для большей части территорий Юга России основной проблемой для сельскохозяйственного производства является дефицит влагообеспечения, и поэтому зерновое хозяйство было и остаётся важнейшей отраслью агропромышленного комплекса. В структуре посевных площадей зерновых культур этих регионов доминируют озимые культуры – озимая пшеница и озимый ячмень, – которые развиваются за счёт зимне-весенних запасов влаги и успевают сформировать урожай до наступления жаркой и сухой

погоды. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть, прежде всего, возможности использования для получения энергии отходов производства зерновых культур - соломы.

В процессе уборки урожая зерновая часть культуры отделяется от стеблевой, и дальнейший способ заготовки соломы зависит от применяемой технологии. Удельный вес отходов весьма значителен: соотношение зерновой части урожая и соломы составляет примерно 1:1.5, поэтому годовые объемы образования соломы близки к общему производству зерновых культур в регионе. Часть соломы остается в виде стерни в поле и запахивается в почву, а оставшиеся ее объемы возможно использовать для получения энергии. Солома злаковых культур имеет достаточно высокую теплотворную способность. Она обладает значительным потенциалом для снижения выбросов в атмосферу  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  по сравнению с угольными станциями. Однако солому сложно использовать для прямого сжигания из-за ее низкой насыпной плотности, высокого содержания хлора и щелочных металлов, значительного выхода летучих компонентов при сжигании. Эти проблемы преодолеваются брикетированием соломы, рядом конструктивных решений при производстве топок котлов. В настоящее время технологии сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии достигли коммерческого уровня и достаточно широко используются в европейских странах [27]. На российском рынке также присутствуют компании, предлагающие широкий диапазон отечественного энергетического оборудования, использующего различные виды биотоплива, в том числе, солому, шелуху семечек подсолнечника, древесные отходы, древесные гранулы, лозу хмеля, винограда и т.п. (например, ООО «Группа компаний БиоТерм», ООО «Ковровские котлы» и др).

В приложениях 1 и 4 приведены некоторые результаты оценок ежегодного валового, республики Крым и Волгоградской области.

Видно, что для всех рассмотренных субъектов характерна значительная внутрирегиональная неоднородность распределения этих потенциалов по территории. Так, в Волгоградской области зерновые культуры выращиваются повсеместно, однако районы с максимальной урожайностью этих культур (и, соответственно, с максимальным валовым

энергетическим потенциалом отходов) расположены на севере и северо-западе области, а районы с минимальными сборами – на востоке и юго-востоке области [2]. В Краснодарском крае территориальное распределение ресурсов отходов зерновых и, соответственно, валового энергетического потенциала в значительной степени определяется рельефом. Зерновые культуры выращиваются на всей его равнинной части, которая занимает более 2/3 территории, и районы с максимальными урожаями этих культур сосредоточены в северной и центральной части края (карта) [3].

В Республики Крым пространственное распределение валового энергетического потенциала отходов также определяется агроклиматическими условиями и рельефом исследуемой территории: максимальный потенциал отходов зерновых сосредоточен в северной и северо-восточной частях полуострова [4].

Наряду с зерновыми одной из основных культур, возделываемых в Краснодарском крае, Волгоградской области и Республике Крым, является подсолнечник. Производство этой культуры сопровождается значительным объёмом побочной биомассы, обладающей высоким энергосодержанием. Отходами производства подсолнечника являются стебли и корзинки, составляющие 350% массы урожая (семян подсолнечника), а также лузга – 18% от массы семян. Эти виды органических отходов обладают разной теплотворной способностью. Для воздушно-сухих условий (влажность 18-20%) теплотворная способность стеблей подсолнечника составляет 3200 ккал/кг, лузги – 3750 ккал/кг [42]. Дифференцированная оценка энергосодержания этих двух видов отходов имеет принципиальное значение, поскольку их переработка в энергопродукты разнесена территориально и требует различных технологий.

Согласно нашим расчетам, энергетический потенциал отходов производства подсолнечника в Волгоградской области составляет приблизительно 85% от энергосодержания зерновых культур, в Крыму - около 60%, в Краснодарском крае – 30% [145].

Территориальное распределение суммарного валового потенциала отходов производства подсолнечника (стебли, корзинки и лузга) в Краснодарском крае, Волгоградской области и Республике Крым представлено в приложениях 2 и 4. Видно, что районы с большими

урожаями зерновых и подсолнечника часто совпадают. Объясняется это обстоятельство тем, что засушливые южные районы страны имеют благоприятные почвенно-климатические условия для обеих культур. По современным представлениям, подсолнечник является хорошим предшественником для посевов озимой пшеницы, так как последняя является культурой с поверхностной корневой системой и будет иметь преимущество перед культурами, требующими наличия подземной влаги. Кроме того, семена подсолнечника пользуются стабильным спросом со стороны переработчиков как внутри страны, так и на международном рынке, что стимулирует аграриев увеличивать площадь под этой культурой.

Анализ проведенных оценок валового потенциала отходов растениеводства в регионах Юга России позволил выделить основные культуры, отходы которых наиболее перспективны для использования в целях получения энергии (Таблица 3.4). Сопоставление суммарного валового потенциала показывает, что по отходам зерновых (солома), подсолнечника (лузга, стебли, корзинки) и кукурузы Краснодарский край значительно опережает другие регионы Юга России.

Таблица 3.4.

Интегральные показатели валового энергетического потенциала отходов производства зерновых, подсолнечника и кукурузы

Субъекты Юга России	Валовый энергопотенциал отходов, тысяч т у.т./год		
	зерновые	подсолнечник	кукуруза
Краснодарский край (статистические данные за 2017 г.)	5 996	1 899	1 950
Республика Крым (2016 г.)	448	262	2,9
Волгоградская область (2014 г.)	1 488	1 254	107*
Республика Дагестан (2017 г.)	107	2*	2*

\* - данные 2018 г.

### ***Отходы садоводства и виноградарства***

Климатические условия южных районов России обеспечивают масштабное развитие садоводства и виноградарства. В соответствии с технологией выращивания винограда ежегодно после уборки урожая, в осенне-зимний период, производится обязательная обрезка растений, в результате которой с каждого гектара виноградников удаляются тонны обрезанной лозы. Также ежегодно производится формирующая и санитарная обрезка плодовых насаждений. Поиски оптимального метода использования значительного количества этой древесной биомассы и анализ целесообразности переработки её с получением энергии проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. В Европе до недавнего времени общепринятой практикой утилизации обрезков было сожжение их на месте образования или измельчение и внесение в почву. Но в последние годы сформировалась устойчивая тенденция добровольного или законодательно закреплённого отказа от сжигания биомассы обрезков древесины как средства их утилизации [28]. При этом обрезки используются не только в качестве древесного топлива для местного населения. Функционируют коммерчески успешные предприятия, на которых эти отходы измельчаются, перерабатываются в щепу или пеллеты и используются для производства технологического пара, тепловой и электрической энергии.

Объемы коммерческого твердого биотоплива из обрезков пока невелики. Основной причиной этого являются проблемы логистики, связанные с рассредоточенностью садовых и виноградных плантаций, а также сравнительно небольшие площади единичных насаждений. На решение этой и других проблем, связанных с использованием растительных отходов сельского хозяйства для производства энергии в Европейском Союзе, направлен ряд проектов программы «Горизонт 2020». В 2016 году закончился проект этой программы EuroPruning, в настоящее время на завершающей стадии находится проект uP\_running, в январе 2019 года стартовал проект AgroBioHeat [149]. Цель проектов – обеспечение широкого использования растительных отходов сельского хозяйства для производства энергии в ЕС. В рамках проектов проведены оценки объемов растительных остатков, включая отходы обрезки многолетних растений (садов, оливковых рощ и виноградников), отходы переработки

сельскохозяйственных культур (оливковые косточки, ореховая скорлупа и др.), которые в больших объемах накапливаются в сельских районах. Разрабатываются эффективные логистические схемы коротких и надёжных поставок этой биомассы и использования её как топлива. Логистические решения включают в себя сбор урожая, транспортировку и хранение сельскохозяйственных отходов. Ожидается, что энергетическое использование агробиомассы окажет положительное социальное воздействие на регионы, а именно, обеспечит создание дополнительных рабочих мест и предотвратит отток молодёжи из сельской местности. Наконец, проекты должны привести к распространению доступных современных технических решений для отопительных систем, которые с высокой эффективностью используют агробиомассу вместо традиционного топлива, снижая тем самым уровень вредных выбросов и улучшая экологическую обстановку регионов.

Юг России имеет хорошие предпосылки для производства энергии из отходов обрезки и выкорчевывания садов и виноградников. Нами были рассчитаны валовые и технические потенциалы отходов садоводства и виноградарства Краснодарского края, Республики Дагестана и Крыма, некоторые результаты которых представлены в Приложении 3 [4, 5].

### *Энергетический потенциал отходов животноводства*

Оценка и анализ энергетического потенциала отходов животноводства были проведены нами для двух регионов Юга России: Волгоградской области и Республики Крым. Основными направлениями животноводства в Волгоградской области являются разведение крупного рогатого скота (КРС) и птицы, свиноводство, овцеводство и козоводство. Энергосодержание отходов жизнедеятельности скота (валовый энергетический потенциал отходов) был рассчитан с дифференциацией до муниципальных районов и городских округов области. Существенно, что в хозяйствах населения области выращивается большая часть животных по сравнению с сельскохозяйственными организациями и крестьянскими (фермерскими) хозяйствами. Так, по данным Росстата на 01.10.2016 г., в этих хозяйствах выращивается 70,7% всего поголовья КРС, 40,3% свиней,

59,7% овец и коз, 41,7% птицы [146]. При расчёте валового энергетического потенциала отходов животноводства представляется не целесообразным учитывать отходы, образующиеся в хозяйствах населения в силу невозможности их сбора (концентрации). В связи с этим нами была введена характеристика «доступный валовой потенциал отходов сельского хозяйства», которая подразумевает потенциал органических отходов, образующихся в производственном секторе сельского хозяйства – в сельскохозяйственных организациях и крестьянско-фермерских хозяйствах, иными словами всех отходов, кроме отходов хозяйств населения. Поэтому оценка энергетического потенциала животноводческих отходов проводилась только по поголовью животных и птицы, выращиваемых в сельскохозяйственных организациях и крестьянских (фермерских) хозяйствах. Из карт Приложения 4 видно, что в Волгоградской области животноводческие хозяйства этого сегмента сосредоточены в центральных, восточных и южных районах области.

В Республике Крым основными направлениями животноводства являются разведение крупного рогатого скота, птицы и свиноводство. Энергосодержание отходов жизнедеятельности скота для этого субъекта также было рассчитано по муниципальным районам и городским округам. В хозяйствах населения Крыма выращивается значительная часть животных по сравнению с сельскохозяйственными организациями и крестьянскими (фермерскими) хозяйствами. Так, по данным Росстата на 01.10.2016 года в этих хозяйствах выращивается 80% всего поголовья КРС, 40% свиней. В связи со сложностями сбора отходов, оценка ресурсов и энергетического потенциала животноводческих отходов для Республики Крым также рассчитывалась только по поголовью животных и птицы, выращиваемых в сельскохозяйственных организациях и крестьянских (фермерских) хозяйствах. Установлено, что в Крыму наиболее крупные животноводческие хозяйства КРС этого сегмента сосредоточены в Первомайском, Джанкойском и Симферопольском районах. Энергетический потенциал отходов жизнедеятельности животных в них составляет 2,9, 2,1 и 1,5 тыс. т у.т./год, соответственно. Свиноводство производственного сектора в значительных размерах развито только в Симферопольском и Красногвардейском районах с

суммарным энергосодержанием отходов 2,1 и 1,5 тыс т у.т./год Крупные птицефабрики Крыма располагаются в Джанкойском и Красногвардейском районах. Валовый энергетический потенциал этого вида отходов составляет 13,2 и 10,6 тыс. т у.т./год соответственно. Расчёты показали, что среди других районов Республики значимый валовый потенциал отходов имеют птицефабрики Сакского и Симферопольского районов – 1,8 и 1,7 тыс. т у.т./год.

Суммарный валовый потенциал отходов животноводства Крыма существенно меньше потенциала отходов растениеводства, но в ряде районов, где располагаются крупные животноводческие комплексы, он является значительным. С учетом токсичности отходов животноводства, содержания в них патогенов, опасных для человека, получение энергии при их переработке может стать дополнительным бонусом при решении трудоёмкой и затратной задачи утилизации этих отходов.

Таким образом, для регионов Юга России со значительными объемами производства сельскохозяйственной продукции (Краснодарский край, Волгоградская область, Республики Дагестан и Крым), с одной стороны, и с различным уровнем энергообеспеченности, с другой, были проведены оценки биоэнергетического потенциала отходов растениеводства. Картографирование и анализ результатов позволил выделить сельскохозяйственные культуры, отходы производства которых наиболее перспективны для получения энергии. Различные виды органических отходов и, следовательно, их валовый энергетический потенциал, неравномерно распределены по территориям регионов, что связано с агроклиматическими условиями, рельефом местности, особенностями землепользования, распределением плотности населения и т.п. При этом большинство регионов Юга России обладает большим энергетическим потенциалом отходов растениеводства зерновых культур и подсолнечника, а также потенциалом древесных обрезков виноградной лозы и плодовых садов. Значительным валовым энергетическим потенциалом обладают также отходы животноводства, который, тем не менее, сложнее преобразовать в энергию по ряду причин. Большая часть скота в исследованных регионах выращивается в хозяйствах населения. Это объясняет невысокие значения доступного валового потенциала

отходов животноводства, который рассчитывается с учетом только производственного сектора. Соответственно, технический потенциал отходов животноводства для регионов Юга России в целом значительно ниже технического потенциала отходов растениеводства.

Величину валового потенциала сельскохозяйственных отходов можно сравнить с энергетическими потребностями регионов. Так по нашим оценкам, для Республики Крым доступный валовый потенциал отходов растениеводства превышает 750 тыс. т у.т./год (по данным за 2016 г.). Это теоретическое энергетическое содержание отходов, и очевидно, что количество энергии, которое реально может быть извлечено из этой биомассы, будет значительно меньше. Тем не менее, рассчитанная величина ресурса значима для энергетики Крыма, так как годовое потребление тепловой энергии в республике в 2017 году составило около 357 тыс. т у.т. И, поскольку котельно-печное топливо практически полностью поставляется на полуостров с материка, энергоносители из отходов растениеводства в виде пеллет и брикетов способствовали бы более широкому использованию местных ресурсов в производстве энергии.

Расчёты показывают, что даже использование только половины валового энергопотенциала отходов растениеводства республики (375 тыс. т у.т./год) для получения тепла позволило бы предотвратить выбросы 729 тыс. т  $\text{CO}_2$ /год. В расчетах было принято, что ТЭЦ расходует 160 кг у.т. на производство 1 Гкал тепла и 0,3 кг у.т. на производство 1кВтч электроэнергии. Средний удельный выброс  $\text{CO}_2$  от топливных станций России на природном газе – 547 г  $\text{CO}_2$ /кВтч [15].

Проведенные исследования требуют перехода от региональных масштабов к муниципальным при оценках валового и технического потенциала отходов биомассы. Этот шаг является переходным между интегральными оценками территорий (зачастую территорий значительной площади) и более детальным исследованием локализации биоэнергетических ресурсов. Картографическая визуализация полученных результатов позволяет исследовать территориальное распределение, сопоставлять объемы ресурса от различных типов источников, определять наиболее перспективные районы для развития биоэнергетики.

### 3.2. Ресурсы и потенциалы солнечной и ветровой энергетики территории Юга России

Для представления природных ресурсов ветровой и солнечной энергии исследуемой территории в картографическом виде были использованы следующие данные:

- дневные суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность (в кВтч/м<sup>2</sup>) (Приложение 5);
- средние скорости ветра по данным NASA POWER на высоте 50 м (в м/с) (Приложение 6);
- повторяемость средних скоростей ветра (в процентах) (Приложение 6).

Все карты характеристик ресурсов солнечной энергии построены для следующих периодов: год в целом, теплые полгода (апрель–сентябрь), лето (июнь–август). При этом выполнена их компоновка на лист по 3 для возможности сравнения и выбора территорий с максимальными ресурсами.

Полученные карты свидетельствуют о том, что регион Юга России характеризуется средними годовыми скоростями ветра на высоте 50 м в пределах от 5 м/с (Краснодарский край) до 7 м/с (в районе г. Волгоград и в предгорьях Северного Кавказа). По картам можно проследить изменения средней скорости ветра на различных высотах – скорость ветра на высоте 50 м выше, чем на высоте 10 м, приблизительно на 1 м/с. Среднегодовые суточные суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в пределах региона составляют 3,5-4,0 кВтч/м<sup>2</sup> в сутки, средние за теплые полгода - 5,0-6,0 кВтч/м<sup>2</sup> в сутки, средние за лето – 5,0-6,5 кВтч/м<sup>2</sup> в сутки. Указанные величины свидетельствуют о значительном солнечном энергетическом ресурсе региона и о средних значениях ветровых ресурсов. В целом по региону наблюдается корреляция значений солнечной радиации с широтной зональностью.

Для оценки валового потенциала солнечной и ветровой энергии использовались следующие данные:

- суточные суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на наклонную поверхность (угол наклона равен широте) (в кВтч/м<sup>2</sup> в сутки) (Приложение 7);
- суточные суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на оптимально ориентированную поверхность (в кВтч/м<sup>2</sup> в сутки) (Приложение 8);
- удельная мощность воздушной струи на высоте 50 м (в Вт/м<sup>2</sup>) (Приложение 9).

Для обеспечения оценок технического потенциала ветровой и солнечной энергии были использованы результаты расчетов выработки тепловой и электрической энергии солнечными и ветровыми установками заданного типа.

Технический потенциал солнечной энергии был отражен эффективностью солнечных водонагревательных установок (СВУ). Показатели эффективности СВУ были оценены на основе моделирования работы солнечных установок в реальных климатических условиях с использованием технических характеристик оборудования. Расчеты были проведены в Объединенном институте высоких температур РАН [66, 70]. Подробное описание моделей не является предметом настоящей работы. Перечислим здесь лишь их основные особенности.

Модели солнечных установок реализованы с использованием программной среды динамического моделирования TRNSYS (Transient System Simulation Tool) [167], применяемой в зарубежных научных центрах для моделирования систем солнечного теплоснабжения и электроснабжения. В качестве исходной климатической информации использовались среднемесячные актинометрические данные, а также данные о температуре и влажности воздуха и скорости ветра, на основе которых генерируется так называемый «типичный метеогод» (Typical Meteor Year – ТМУ), представляющий собой годовые последовательности часовых метеорологических и актинометрических величин. Солнечная установка моделируется поэлементно с обеспечением между элементами необходимых информационных

связей, отражающих связи физических параметров, описывающих работу компонентов установки.

Для оценки технического потенциала солнечной энергии, как указывалось выше, нами использовались результаты расчета эффективности работы солнечных водонагревательных установок, основой частью которых являются солнечные коллекторы. На рынке имеется широкий выбор солнечных коллекторов различных конструкций: от простейших плоских бесстекольных, применяемых для подогрева воды в плавательных бассейнах, до трубчатых вакуумированных, в том числе с оптическими концентраторами, позволяющих получать температуры теплоносителя до 200°C и выше. В солнечных водонагревательных установках наиболее широкое применение находят относительно недорогие и простые по конструкции плоские одностекольные солнечные коллекторы. Такие коллекторы выпускаются и рядом российских производителей (Ковровский машиностроительный завод, «ВПК «НПО машиностроения» и др.) [68].

В приложениях 10-15 представлено пространственное распределение рассчитанных показателей эффективности использования трех типовых солнечных водонагревательных установок с солнечным коллектором площадью 2 м<sup>2</sup>. На картах отражены результаты оценок для следующих видов оборудования: плоскостной коллектор, ёмкостной коллектор и вакуумированный коллектор. В качестве показателя эффективности была использована доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения за счет солнечной энергии. Расчеты были проведены для следующих временных периодов: 1) летние месяцы (июнь–август), 2) теплое полугодие (апрель–сентябрь), 3) год. Значения температуры нагрева воды (37°C, 45°C и 55°C) определены на основе ГОСТов на температуру воды для горячего водоснабжения. Так, температура воды 37°C уже ощущается как теплая. Вода температуры 45°C и 55°C определяется в водопотреблении как горячая [66].

В качестве технического потенциала ветровой энергии для Юга России была принята расчетная производительность (т. е. выработка энергии за год) трех типовых ветроустановок, «помещенных» в узлы сетки 1°×1° (Приложение 9). Для расчета были выбраны современные

серийно выпускаемые ветроэнергоустановки высотой 50 м и мощностью 150 кВт (модель NORDEX N 27–50), 600 кВт (модель VESTAS V 44–50) и 1300 кВт (NORDEX N 60-50). Характеристики ветроэнергоустановок представлены в таблице 3.5.

Полученные карты валового и технического потенциалов свидетельствуют о том, что валовый энергетический потенциал солнечной и ветровой энергии на территории Юга России пространственно коррелирует с максимальными значениями приходящей солнечной энергии и максимальной повторяемостью скорости ветра в диапазонах 2-6 и 6-10 м/с. Наиболее эффективным для Юга России оказалось использование емкостных коллекторов, которые в теплые полгода покрывают потребности в горячем водоснабжении большей части территории на 90-100%. Максимальным техническим потенциалом ветровой энергии характеризуются территории Волгоградской области, Республики Калмыкия, Астраханская область, а также Республики Чечня и Дагестан.

Таблица 3.5

Характеристики ветроэнергоустановок, использованные в расчетах

<b>Производитель</b>	<b>Модель</b>	<b>Мощность, кВт</b>	<b>Высота мачты, м</b>	<b>Диаметр ветроколеса, м</b>	<b>Ометаемая площадь, м<sup>2</sup></b>
Nordex	NORDEX N 27–50	150	50	27	572,56
Vestas	VESTAS V39–50	600	50	39	1194,59
Nordex	NORDEX N 60–50	1300	50	60	2827,43

Методика обработки данных и построения карт включала получение первичной информации из базы данных NASA POWER [142] для широтно-долготного диапазона, соответствующего территории Юга России в пространственной сетке (1° x 1°) по широте и долготе. В результате были сформированы 100 файлов, относящихся к каждой точке сетки широта – долгота. Затем все файлы были сведены в единый массив, содержащий результаты расчета вышеперечисленных

характеристик солнечной и ветровой энергии на каждый месяц года, по сезонам и среднегодовые значения.

В связи с тем, что метеоданные NASA POWER получены путем моделирования и, согласно проведенным в [148] результатам их верификации, малопригодны для территорий с сильно расчлененным рельефом, на всех картах выделена штриховкой территория Большого Кавказа, как территории, для которых точность полученных оценок потенциалов по крайней мере неопределенна.

Массив подготовленных данных о характеристиках солнечной и ветровой энергии шире перечня построенных в результате работы карт. Это позволяет при необходимости создавать карты для отдельных месяцев года или наносить на карты информацию, имеющую сугубо прикладное значение (например, величина оптимального угла наклона солнечного коллектора и т.д.).

При составлении карт были использованы картографические программы, а также программы, создающие модели рельефа и абстрактных геополей, и позволяющие по исходным точкам дискретного характера получать непрерывные поверхности. Согласно методике картографирования ресурсов солнечной и ветровой энергии, изложенной во 2 главе, интерполяция значений солнечной радиации производилась методом сплайнов, интерполяция характеристик ветровой энергии – методом обратно взвешенных расстояний с учетом шероховатости поверхности.

В качестве тестовой территории для дальнейшего анализа факторов, влияющих на размещение объектов ВЭ, была выбрана Волгоградская область, как обладающая достаточным природным потенциалом ветровой и солнечной энергии. На основе факторов, определяющих природные и экологические ограничения, было проведено районирование территории по степени пригодности для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики (Приложение 16) и обоснованы критерии оценки социально-экономических предпосылок к развитию ВЭ. При районировании территории учитывались факторы следующих типов:

- природные (рельеф, гидрология, современные геологические процессы),
- экологические (особо охраняемые природные территории, памятники природы и культуры, земли сельскохозяйственного назначения с особыми условиями использования (сады, леса));
- технические (наличие опыта реализации проектов на ВИЭ);
- социальные (демография);
- экономические (динамика энергопотребления).

Для большей гибкости анализа факторы делились по нескольким уровням влияния на решение (табл.1, 2).

В целях разработки комплексной карты пригодности территории для создания объектов генерации энергии на ВИЭ (Приложения 22, 23), были составлены карты, необходимые на первичном этапе оценки:

- карта земельных ресурсов;
- карта транспортных сетей;
- карта современных геологических процессов;
- карта особо охраняемых природных территорий;
- карта динамики энергопотребления.

*Карта «Земельные ресурсы» (факторы №№ 11,12 – нумерация согласно Приложению 16) (Приложение 17)*

Структура использования земель, отраженная на этой карте, позволяет выделить сельскохозяйственные земли с более строгими ограничениями по их использованию (такие как сады, леса) и те, на которых возможно сооружение объектов солнечной и ветровой энергетики при полном учете воздействия их на окружающую среду (сенокосы, пашни, пастбища).

Пашня занимает более половины территории Волгоградской области. Вторую по величине часть занимают сенокосы, пастбища, выгоны. Согласно исследованиям по воздействию объектов солнечной и ветровой энергетики на окружающую среду и мировому опыту, сооружения этого типа не только не оказывают негативного

воздействия на домашних животных и растения, но в некоторых случаях наблюдается взаимовыгодный симбиоз.

Леса, распространенные по долинам рек, и сады, расположенные вблизи крупных городов, можно выделить как менее благоприятные для объектов ВЭ территории, т.к. строительство на них сопряжено с вырубкой деревьев, а, следовательно, с существенным воздействием на окружающую среду и возможными экономическими потерями.

*Карта «Дорожно-транспортная сеть» (критерии №№ 14, 15)  
(Приложение 18)*

Существенной причиной для представления дорожно-транспортной сети в виде отдельной карты является их двойственность с точки зрения учета факторов, влияющих на размещение объектов ВЭ. Дороги, с одной стороны, являются территорией с буферной зоной, где сооружение крупномасштабных энергообъектов невозможно. С другой стороны, наличие транспортной сети вблизи проектируемого объекта на ВИЭ является одним из основных факторов, обеспечивающих успешную реализацию проекта, т.к. сильно снижает объём инвестиций.

На карте дорожно-транспортной сети Волгоградской области отображены железные дороги, федеральная трасса Москва-Дон и автомобильные дороги местного назначения. Помимо этого, показаны пунсонами административные муниципальные центры и некоторые другие города для ориентации по листу карты. Можно отметить, что Волгоградская область достаточно плотно покрыта дорожной сетью, что благоприятно для поиска площадок и реализации проектов ВЭ.

*Карта особо охраняемых территорий (критерии №№ 1,2,3,4,5,9)  
(Приложение 19)*

При составлении карты учтены особо охраняемые природные территории федерального и местного значения: природные парки и заказники, территории лесного фонда. На территории Волгоградской области расположены:

- 7 природных парков общей площадью 7077 км<sup>2</sup>: «Волго-Ахтубинская пойма» «Донской», «Нижнехопёрский», «Усть-Медведицкий», «Цимлянские пески», «Щербаковский», «Эльтонский»;
- 8 государственных природных заказников общей площадью 195,65 км<sup>2</sup>: «Дрофинь», «Задонский», «Куланинский», «Кумылженский», «Лёщевский», «Ольховский», «Раздорский», «Чернополянский»;
- 15 памятников природы.

Также на карте показаны территории военной безопасности и обороны (в Палласовском и Калачевском районах).

Особое внимание обратим на ключевые орнитологические территории, которые включены в рассмотрение в связи с необходимостью учета гибели птиц при проектировании ветроэнергетических станций. Ключевые орнитологические территории выделяются на основании специальных критериев, разработанных координационным центром программы КОТР в соответствии с требованиями Союза охраны птиц России и Международной ассоциации в защиту птиц «BirdLife International». На территории Волгоградской области выделено 25 ключевых орнитологических территорий. Многие из них находятся на охраняемых природных территориях [20].

### *Карта «Население»*

Карта населения Волгоградской области представлена в Приложении 20 и отражает показатели численности населенных пунктов и плотности населения по муниципальным районам. Населенные пункты разделены на крупнейшие города (Волгоград, Волжский, Камышин), города с населением от 30 до 60 тысяч человек (Урюпинск, Михайловка, Фролово), населенные пункты от 3 до 30 тысяч, от 1 до 3 тысяч и менее 1 тысячи. Использована относительная шкала условных знаков. Шрифтом выделены города, поселки, поселки городского типа и сельские населенные пункты.

По плотности населения выделено 4 типа территорий: высокая плотность населения (более 100 человек на км<sup>2</sup>) – городская территория

Волгограда, территории с плотностью населения от 20 до 100 и от 10 до 20 человек на км<sup>2</sup>, территории с низкой плотностью населения – менее 10 человек на км<sup>2</sup>). Источником для составления карты послужили данные Всероссийской переписи населения 2010 года [45].

В качестве врезки на карте представлены графики динамики энергопотребления на душу населения в бытовом секторе и в целом, а также электровооруженности труда, по которым можно сделать вывод о росте потребления энергии населением в последние годы (начиная с 2011 г.), что связано с экономической стабилизацией в регионе. Таким образом, карта позволяет сделать вывод, что при общей динамике роста энергопотребления наиболее перспективными для сооружения новых энергетических объектов могут стать районы с более высокой плотностью населения.

#### *Карта динамики энергопотребления (Приложение 21)*

Карта составлена по данным Программы развития электроэнергетики Волгоградской области до 2020 года [35]. На карте отражена динамика электропотребления по 4 энергорайонам: Левобережный, Волгоградский, Северный и Южный. Отмечен рост энергопотребления в Волгоградском и Левобережном районах. В качестве врезки на карте представлена общая структура электропотребления региона, где основную долю представляет промышленность (59%), при этом население потребляет 10% всей вырабатываемой в регионе электроэнергии. Сравнение этой карты с картой населения может быть основой для выделения перспективного в плане внедрения новых мощностей района Волгоградской области – Левобережного района, – который отличается более высокими темпами роста по нескольким социально-экономическим показателям.

#### *Общие карты перспективности территории для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики (Приложения 22, 23)*

Результатом проведенного исследования стали комплексные карты, где были суммированы все факторы, ограничивающие размещение объектов ВЭ и учтены предпосылки к развитию ВЭ в

регионе. Из карт видно, что на большей части Волгоградской области проекты солнечной и ветровой энергетики могут быть реализованы с учетом их воздействия на окружающую среду. Достаточно четко на картах выделяется Левобережный район, характеризующийся ростом плотности населения и ростом энергопотребления, что влечет за собой необходимость в сооружении новых энергообъектов.

Суммирование факторов проводилось согласно присвоенным в ходе ранжирования баллам с привлечением экспертных оценок. На данном этапе развития ВЭ в России представляется сложным полностью автоматизировать этот процесс, т.к. при рассмотрении каждого конкретного региона страны необходимо оценивать наличие и значимость отдельных критериев на исследуемой территории. Тем не менее, методика, изложенная в главе 2, включает в себя достаточно широкий перечень типов факторов, и универсальна для применения при любом количестве факторов и их весовой оценке.

Совместный анализ карт технического потенциала и карт перспективности территории для размещения энергообъектов различной мощности показал, что единичные установки горячего водоснабжения и фотоэлектрореобразователи могут применяться и будут эффективны на большей части Волгоградской области. Для размещения крупных ВЭС и СЭС наиболее перспективным является Левобережный район Волгоградской области, в той его части, где отсутствуют строгие ограничения. Следует отметить, что результаты анализа неплохо коррелируют с уже существующими в Волгоградской области объектами солнечной и ветровой энергетики. Это свидетельствует о состоятельности разработанной методики.

Апробация методики показала, что предложенный состав серии карт достаточно полно обеспечивает оценку ресурсов возобновляемых источников энергии на региональном уровне. Совместный анализ карт валового и технического потенциала позволяет оценить перспективы использования различных типов энергетических установок на ВИЭ, провести сравнительный анализ ветровых характеристик на различных высотах и значений солнечной радиации, приходящей на поверхности южной ориентации с различными углами наклона, определить

прогнозируемую выработку тепловой и электрической энергии. При этом первостепенным является использование всех доступных источников данных и их верификация.

Карты факторов и ограничений, влияющих на размещение объектов на ВИЭ, позволяет определить площадки, наиболее перспективные для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики. При этом составление отдельных карт, отражающих группы факторов, обеспечивают возможность уточнения, какой именно тип ограничения является определяющим для той или иной территории. Это может облегчить поиск информационных материалов и их анализ при проектировании энергообъектов на более крупных масштабах. Состав блока карт факторов и ограничений может меняться в зависимости от природных, климатических и других особенностей региона. При этом общая логика анализа и их тематическое содержание не меняются.

Карта перспективности территории является основным результатом проведенной оценки. На ней выделены площадки полностью непригодные для размещения объектов на ВИЭ и с низкой степенью пригодности. Видно, что около 50% территории Волгоградской области имеют высокую степень пригодности к развитию ВЭ по природным и экологическим факторам, а также социально-экономическим предпосылкам. Вся серия карт в целом позволяет проводить оценку ресурсов и потенциалов солнечной и ветровой энергии на региональном уровне с достаточным для этого масштаба разрешением и достоверностью. Серия карт является информационной основой для решения разнообразных задач, возникающих при региональном планировании в энергетической сфере.

## Заключение

В России в последнее десятилетие в связи с развитием возобновляемой энергетики стали актуальными достоверные оценки и картографирование ресурсов, валового и технического потенциала различных видов ВИЭ. Выполнены проекты по анализу территории в целом, определению ресурсов всех видов ВИЭ на уровне субъектов Федерации [11]. Однако, в связи с ростом интереса к использованию возобновляемых источников энергии – как в сетевой энергетике, так и в микрогенерации частными производителями – все более востребованными становятся специализированные карты и геоинформационные системы регионального уровня.

Представленный в работе обзор современных исследований в тематической области позволяет заключить, что зарубежные геоинформационные системы и карты, созданные для целей возобновляемой энергетики, имеют различный уровень охвата территории (локальные, региональные, национальные, всемирные), тематическую направленность (ветровая-солнечная-геотермальная энергетика и др., или комплексные); основаны на данных различной генерализации (данные в каждой точке координатной сетки – статистические данные, относящиеся к региону в целом). Функционал ГИС также достаточно широк: они предоставляют пользователю доступ к исходным данным и тематически связанным характеристикам территории, либо предлагают конечные результаты оценок ресурсов и потенциалов различных видов ВИЭ. При этом атласы и ГИС могут являться открытыми ресурсами или коммерческими проектами. Анализ зарубежных ГИС, а также учет специфики территории и развития возобновляемой энергетики в России позволили разработать методические основы для отечественных исследований в этой области.

К специфике территории РФ относится, в частности, чрезвычайно редкая с точки зрения ВЭ сеть актинометрических и метеорологических станций, что заставляет использовать комбинирование источников данных. Широко применяемые данные реанализов требуют верификации с учетом высоты измерений скорости ветра.

Необходимыми является также разработка и обоснование методов интерполяции для картографирования широкого перечня характеристик солнечной и ветровой энергии, в том числе производных (расчетных) величин.

Значительность территорий отдельных субъектов федерации приводят к тому, что оценки и картографирование ресурсов биоэнергетики, проведенные на основе данных Росстата, зачастую дают нереалистичную картину распределения ресурсов биомассы. Для картографирования этих ресурсов и потенциалов биоэнергетики необходим, как минимум, муниципальный уровень детализации исходных данных.

Помимо оценки ресурсов актуальным является разработка методики картографирования энергетических потенциалов возобновляемых источников с учетом ограничивающих факторов различного генезиса: природных, экологических, социально-экономических и др. Данное направление анализа в настоящее время активно развивается в мире. Авторами предложена методика картографирования, основанная не только на зарубежных аналогах, но и на введенных в настоящее время в РФ нормативных документах, опыте проектирующих компаний, работающих на территории России, а также классических географических и картографических подходах.

Методика геоинформационного картографирования ВИЭ рассмотрена на примере ресурсов солнечной, ветровой энергии и энергии биомассы. Определен состав, масштабы, временные периоды данных для составления карт. Выделены 2 блока карт: ресурсов и потенциалов, с одной стороны, и пригодности территории для размещения объектов солнечной, ветровой и других видов возобновляемой энергетики, с другой. Обосновано, что оценки территории должны быть основаны на факторном анализе с привлечением экспертных оценок. При составлении карт и анализе территории учтены величина и территориальное распределение ресурсов и потенциалов солнечной и ветровой энергии, факторы, ограничивающие размещение объектов на ВИЭ (природные, экологические, технические), факторы, влияющие на развитие ВЭ в

регионе (социальные и экономические). Предложенная методика апробирована на территории Юга России. Выявлены районы с наиболее перспективными условиями для реализации проектов солнечной и ветровой энергетики, а также проведен анализ муниципальных образований отдельных регионов Юга России с точки зрения перспективности развития биоэнергетики на отходах сельского хозяйства (зерновых культур, подсолнечника, обрезков садов и виноградников, отходов животноводства).

Полученные результаты и подходы стали основой для дальнейших исследований в области геоинформационного картографирования ресурсов ВИЭ в России.

## Литература

1. Акишин А.С. Природно-ресурсный потенциал России и Волгоградской области: состояние, управление, перспективы: Учебное пособие. – Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2006. – 336 с.
2. Андрееенко Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Комплексный анализ распределения ресурсов биоэнергетики для территории Волгоградской области // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 07-09(219-221). – С. 49–59
3. Андрееенко Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Оценка ресурсного обеспечения биоэнергетики в регионах Юга России // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы V Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во ИП Кучеренко В.О., 2019. – С. 48–55.
4. Андрееенко Т.И., Киселёва С.В., Рафикова Ю.Ю. Оценка энергетического потенциала отходов растениеводства Крымского Федерального округа // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 5(20). – С. 449–455.
5. Андрееенко Т.И., Киселёва С.В., Шакун В.П. Оценка энергетического потенциала органических отходов регионов России: Дагестан // Сборник материалов IV Междунар. конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». 21-24 сентября 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Т. 2. – ИП Овчинников (АЛЕФ) Махачкала, 2015. – С. 307–314.
6. Андрееенко Т. И., Рафикова Ю. Ю. Энергопотенциал биомассы отходов культивирования винограда и плодовых деревьев муниципальных районов Дагестана // Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы (3-6 декабря 2018). – Москва, 2018. – С. 376–382.

7. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Иванов Т.С. Методические аспекты геоинформационного обеспечения инвестиционных проектов по развитию гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 5. С. 7-10.
8. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Оценка природно-ресурсного потенциала территории с использованием ГИС-технологий // Региональная экология. – 1998. – № 1. С. 17-23.
9. Атлас Волгоградской области. – Киев: ГУГК, 1993. – 32 с.
10. Атлас Волгоградской области. – М.: ГУГК, 1967. – 40 с.
11. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреевко, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова и др. – РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2015. – 160 с.
12. Атлас энергетических ресурсов СССР. Т. 1, Ч. 3. Гидроэнергетические, ветроэнергетические, гелиоэнергетические ресурсы. – 1935.
13. Багрова Л.А., Боков В.А., Черванев И.Г. Энергетика мира // Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма. Монография. – Симферополь, 2009. – С. 18-32.
14. Башта А.И., Боков В.А., Буряк В.В., Горбунов Р.В., Смирнов В.О. Ноосферная устойчивость региона: перспективы продвижения технологий новой энергетики и оптимизация устойчивого развития региона // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 5-3 (49). – С. 109-114.
15. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: ГНУ ВИЭСХ РАСХН, 2005. – 264 с.
16. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Борисов Г.А. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под общ. ред. П.П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.
17. Берлянт А.М. Картография: учебник для вузов – М.: Аспект Пресс, 2002. – 336 с.
18. Борисенко М.М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Труды ГГО. – 1974. – Вып. 320. – 205 с.

19. Борисенко М.М., Стадник В.В. Атласы ветрового и солнечного климатов России. – СПб.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1997.
20. Брылёв В.А. Особо охраняемые природные территории / В.А. Брылёв, В.А. Сагалаев. – Волгоград: Перемена, 2000. – 260 с.
21. Брылев В.А. Природные условия и ресурсы Волгоградской области / Под ред. В.А. Брылева. – Волгоград: Перемена, 1995. – 264 с.
22. Вимберг Г.П., Елисеева И.Б. Оценка деятельности подразделений методом таксономии. – Информ. Фонд ОФАП ВНИИГМИ-МЦД. № 0919. – 1985.
23. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В, Кривенкова С.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Расчет ресурсов солнечной энергетики / Под ред. В.И. Виссарионова – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 61 с.
24. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 27 декабря 2018 года) (редакция, действующая с 1 июля 2019 года) [Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901982862>]
25. Волкова Е.С., Мельник М.А. Энергетическая характеристика возобновляемых природных ресурсов региона средствами ГИС (на примере Томской области) // Успехи современного естествознания. – № 2. – 2016. – С. 148-153.
26. Волковая О.О. Застосування ГІС при розробці стратегії розвитку вітроенергетики на рівні адміністративного району // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2013. – Вип. 17. – с. 9–12.
27. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Перспективы использования сельскохозяйственных отходов для производства энергии на Украине. Аналитическая записка БАУ № 7. 2014 г.
28. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Драгнев С.В., Башенный А.И., Перспективы использования биомассы от обрезков и удаления многолетних сельскохозяйственных насаждений для производства энергии на Украине // Промышленная теплотехника, – 2018. – Т. 40. – № 1. – с. 68-74.
29. Горбунова Т.Ю., Горбунов Р.В. Подходы к оценке теоретического и технического потенциалов территории для возможности

- внедрения систем солнечной энергетики (на примере территории Юго-Восточного Крыма) // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и IX научной молодёжной школы «Возобновляемые источники энергии». – М., 2014. – С. 100-108.
30. Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Ильина О.И., Рафикова Ю.Ю., Панченко В.А. Потенциал использования солнечной энергетики на территории большой Феодосии // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 11-3. – С. 63–72.
  31. ГОСТ Р 51991-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования. [Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/40/40075/>].
  32. Гриневич Г.А. Исследования характеристик режима возобновляющихся источников энергии – воды, ветра и солнца. – Ташкент, 1963.
  33. Гриневич Г.А. Опыт разработки элементов малого ветроэнергетического кадастра Средней Азии и Казахстана. – Ташкент, 1952.
  34. Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект». – 2013. – 888 с.
  35. Долгосрочная областная целевая программа "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности Волгоградской области на период до 2020 года". [Режим доступа: [vce34.ru/attachments/docr\\_2013г.doc](http://vce34.ru/attachments/docr_2013г.doc)].
  36. Игнатьев С. Г. Решение теоретических задач ветроэнергетики с позиций теории вероятностей одномерной случайной величины // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2011. – № 2. – С. 14–30.
  37. Игнатьев С.Г., Киселева С.В. Развитие методов оценки ветроэнергетического потенциала// Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2010. – № 10(90). – С. 10-35.
  38. Киселева С.В. Дистанционные методы оценки ресурсов возобновляемых источников энергии // Возобновляемые источники

- энергии: Лекции ведущих специалистов. Выпуск 5. – М., 2008. – С. 80-111.
39. Киселева С.В., Нефедова Л.В. ВИЭ для рекреационных целей // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010. – № 3. – С. 25–29.
  40. Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Использование климатических баз данных для оценки природно-ресурсного и технического потенциала ветровой энергии // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 32–40.
  41. Киселева С.В., Чернявский А.А. Анализ результатов ветромониторинга на площадке предполагаемого строительства Ейской ВЭС // Материалы международного семинара «Экологические проблемы современности». – Майкоп, 2009. – С. 141-147.
  42. Клюс С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твёрдого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2(24). – С. 8-13.
  43. Ключевые орнитологические территории России. Т. 1. Ключевые орнитологические территории международного значения в Европейской России. – М.: Союз охраны птиц России, 2000. – 702 с.
  44. Коломиец Ю.Г., Горбаренко Е.В., Киселева С.В., Мордынский А.В., Фрид С.Е., Шиловцева О.А. Актинометрические данные для проектирования солнечных энергоустановок в Московском регионе // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – № 21-22. – С. 12–24.
  45. Константинов В.А. К вопросу о ветроэнергетическом кадастре СССР. // В сборнике: Энергетические ресурсы СССР, т. 2. – М. – 1938.
  46. Красовский Н.В. Энергетические ресурсы ветра. // В кн.: Атлас энергетических ресурсов СССР, т. 1, ч. 3. – М. – 1935.
  47. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2012. – 50 с.
  48. Летопись погоды, климата и экологии Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). Вып. 1. – 2000 г. – М.: Изд-во географического ф-та МГУ, 2002. – 102 с.

49. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник / И.К. Лурье. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.
50. Марчуков В.С. Ресурсно-экологическая картография / В.С. Марчуков С.А. Сладкопечев. – М.: МИИГАиК, 2005. – 196 с.
51. Методы разработки ветроэнергетического кадастра // Сб. ст. – М. – 1963.
52. Молодан Я.Є. Особливості життєвого циклу вітроенергетичних установок як фактор впливу на компоненти ландшафту // Фізична географія та геоморфологія. – 2013. – Вип. 3 (71). – с. 167–176.
53. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / Под редакцией канд. физ.-мат. наук Николаева В.Г. – М.: Изд-во «Атмограф», 2007. – 596 с.
54. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 13, части 1-6. Волгоградская, Ростовская, Астраханская области, Краснодарский, Ставропольский края, Калмыцкая, Кабардино-Балкарская, Чечено-Ингушская, Северо-Осетинская АССР. – Л.: Гидрометеоздат. – 1990. – 342 с.
55. Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю. Региональный анализ эколого-географических факторов освоения возобновляемых источников энергии в сельских районах // Труды 9-ой Международной научно-технической конференции "Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве", Москва 21-22 мая 2014. – Т. 4. – ГНУ ВИЭСХ Москва, 2014. – С. 14–18.
56. Николаев В.Г. Актуальные научно-технические задачи на этапе становления российской ветроэнергетики // Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов. Выпуск 7. – М., 2012. – С. 80-111.
57. Новаковский Б.А., Красовская Т.М., Тульская Н.И. Использование цифрового моделирования рельефа и дистанционного зондирования для актуализации мелкомасштабных ландшафтных и экологических карт горных районов // Геоинформатика / Geoinformatika. – 2005. – № 4. – С. 3–8.

58. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Геоинформационные системы по возобновляемой энергетике // Сб. тр. Международной Конференции ИнтерКарто-ИнтерГИС 17. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт, Барнаул – Денпасар. – Барнаул, 2011. – С. 10–14.
59. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии (на примере энергии ветра) // Геодезия и картография. – 2012. – № 11. – С. 31–39.
60. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Рафикова Ю.Ю., Каргашина М.А., Манжилевский Ю.В. Воздействие объектов ветроэнергетики на окружающую среду // Геодезия и картография. – 2013. – № 10. – С. 39–44.
61. Отчет о технико-экономических показателях и расходе условного топлива электростанций общего пользования, включая районные котельные РАО «ЕЭС России». Федеральная служба государственной статистики (РОССТАТ). [Режим доступа: <http://www.gks.ru/>].
62. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году. СО ЕЭС. – 2018.
63. Официальная публикация итогов Всероссийской переписи населения 2010 года. Том 1. Численность и размещение населения. Федеральная служба государственной статистики [Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/perepis2010/croc/perepis\\_itogi1612.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm)]
64. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики вычислений. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 335 с.
65. Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. – Л.: Гидрометиздат, 1988. – 291 с.
66. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2004. – № 4. – С. 104.

67. Попель О.С., Реутов Б.Ф., Антропов А.П. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике // Теплоэнергетика № 11. – 2010. – С. 2-11.
68. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 83с.
69. Попель О.С., Фрид С.Е., Киселева С.В., Коломиец Ю.Г., Лисицкая Н.В. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.
70. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Методика оценки эффективности использования солнечных водонагревательных установок в климатических условиях Российской Федерации. – М.: Изд-во МФТИ, 2004.
71. Проект Федерального закона N 581324-7 "О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации" (ред., принятая ГД ФС РФ в I чтении 06.02.2019)
72. Прохорова Е.А. Географическое картографирование: социально-экономические карты: Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2009. – 263 с.
73. Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года». [Режим доступа: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_83805/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83805/)].
74. Рафикова Ю.Ю. Использование спутниковых данных при оценке ресурсов солнечной и ветровой энергии // Сб. ст. участников всерос. мол. науч. Школы «Современные проблемы географии и гидрологии суши». – М., 2010. – С. 69–71.
75. Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В., Нефедова Л.В. Использование ГИС-технологий в области возобновляемой энергетики:

- зарубежный и отечественный опыт // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 12. – С. 96-106.
76. Реестр установок в Мурманской области, работающих на возобновляемых источниках энергии. Агентство энергетической эффективности Мурманской области. [http://acemo.ru/metodicheskie\\_ma/vozobnovlyaemye/](http://acemo.ru/metodicheskie_ma/vozobnovlyaemye/)
77. Рекомендации по определению климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 31 с.
78. Рустамов Н.А., Андреев Т.И., Варигина Л.В. О стандартизации для обеспечения развития энергетики возобновляемых источников в России // Мир стандартов. – 2013. – Т. 2, № 73. – С. 5–8.
79. Рыженков М.А., Ермоленко Б.В., Ермоленко Г.В. Экологические аспекты ветроэнергетики // Теплоэнергетика. – 2011. – № 11. – С. 72–79.
80. Сажин А.Н. Природно-климатический потенциал Волгоградской области: Научное исследование природно-климатических ресурсов области за 100-летний период. - Волгоград, 1993. – 170 с.
81. Самсонов Т.Е. Мультимасштабное картографирование рельефа на основе создания баз геоданных: Автореферат дисс. канд. геогр. наук. – Москва: МГУ, 2010. – 26 с.
82. СНиП 2.01.15-90. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования. [Режим доступа: [http://gostbank.metaltorg.ru/data/norms\\_new/snip/79.pdf](http://gostbank.metaltorg.ru/data/norms_new/snip/79.pdf)].
83. Соловьев А.А. Аналитические методы прогноза энергопотребления // Энергетическая политика. – 2009. – № 5. – С. 17-23.
84. Справочник по климату СССР. Ч. III. Ветер. Вып. 1–3, 8-9, 12–13, 17, 20–29, 33–34. – Л.: Гидрометеиздат, 1966–1967.
85. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива: (показатели по территориям) / Под ред. д.т.н. Безруких П.П. – Москва: ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
86. Справочник эколого-климатологических характеристик г. Москвы (по данным Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1.

- Солнечная радиация, солнечное сияние. Метеорологические элементы и явления. Характеристики пограничного слоя атмосферы. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2003. – С. 35-87.
87. Стадник В.В. Районирование территории СССР по характеристикам изменчивости солнечной радиации. // Материалы XII Совещания по актинометрии. Использование актинометрической информации для нужд народного хозяйства. – Иркутск, 1984. – С. 90-93.
  88. Стадник В.В. Статистические характеристики суточных сумм суммарной радиации // Труды ГГО. – 1983. – Вып. 475. – С. 61-68.
  89. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. – М.: Изд. «Можайск-Терра», 2000. – 201 с.
  90. Тарасенко А.Б., Киселева С.В., Попель О.С., Титов В.Ф. О выборе оптимального состава гибридной энергетической установки для изолированного поселка // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 2. – С. 177–182.
  91. Тарнижевский Б.В. Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России // Теплоэнергетика. – 1996. – № 5. – С. 20-25.
  92. Тетерина Н. В., Тарасенко А. Б., Киселева С. В. Возможности оптимизации энергетического баланса островного поселения (на примере пос. Соловецкий Архангельской области) // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 5-6.
  93. ТЭК и экономика регионов России. – М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2007. – 660 с.
  94. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
  95. Федеральный закон от 4 ноября 2007 г. N 250-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с осуществлением мер по реформированию Единой энергетической системы России". [Режим доступа: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_72255/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72255/)].
  96. Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». [Режим доступа: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/)].

97. Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Сушникова Е.В, Ямудер В.Ф. Эффективность и перспективы использования различных систем солнечного нагрева воды в климатических условиях Российской Федерации // Теплоэнергетика. – 2011. – № 11. – С. 26-31.
98. Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Лисицкая Н.В., Попель О.С., Киселева С.В. Программа для работы с климатологическими данными NASA и RetScreen для различных регионов России. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2011617226. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 сентября 2011 года.
99. Хлебникова Е.И. Численные стохастические модели временных метеорологических рядов и их прикладные возможности // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2008. Выпуск 557. С. 34-52.
100. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 150 с.
101. Baban S.M. and J.T. Parry. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK // Renewable energy. – 2001. – 24(1). – P. 59–71.
102. Beata Sliz-Szkliniarz, Joachim Vogt. GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko–Pomorskie Voivodeship// Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1696–1707.
103. Batzias FA, Sidiras DK, Spyrou EK. Evaluating livestock manures for biogas next term production: a GIS based method. Renewable Energy 2004;30:1161–76
104. Broersma, S., Fremouw, M., Dobbelsteen, A. van den and Rovers, R., “Warmtekaarten – Nederlandse warmtekaracteristieken in kaart gebracht,” TU Delft, Faculty of Architecture, 2010
105. Buishand T.A., Beersma J.J., Sluiter R. & T. Kroon. Definitiestudie rasterdata meteorologie. // De Bilt, KNMI / RWS Waterdienst, 2008.
106. Coppin, P.A., K.A. Ayotte and N. Steggel, 2003: “Wind Resource Assessment in Australia – A Planners Guide”. A Report of the CSIRO Wind Energy Research Unit, CSIRO Land and Water.

107. Dagnall S, Hill J, Pegg D. Resource mapping and analysis of farm livestock manures—assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. *Bioresource Technology* 2000;71:225–34
108. Van den Dobbelsteen, A., Broersma, S.; Stremke, S. Energy potential mapping for energy-producing neighborhoods. *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* 2011, 2, pp. 170–176.
109. Dobbelsteen, A., Van den, Jansen, S., Timmeren, A. Van and Roggema, R., “Energy Potential Mapping – A systematic approach to sustainable regional planning based on climate change, local potentials and exergy,” *Proceedings of the CIB World Building Congress 2007*, CIB/CSIR, Cape Town, 2007.
110. Dominguez, J., and J. Amador (2007). Geographical information systems applied in the field of renewable energy sources. *Computers & Industrial Engineering*, 52(3), pp. 322-326.
111. Erbs, D.G., Klein S.A., Duffie J. A. Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly average Global Radiation. // *Solar Energy*. 1982. V. 28, No. 4. PP. 293-302.
112. EPA Renewable Energy Sites. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Center for Program Analysis. U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER), 2008/11/20. Washington, DC [Режим доступа: <https://geopub.epa.gov/repoweringApp/>].
113. Escobar, R.A., Corte’s, C., Pino, A., Pereira, E.B., Martins, F.R., Cardemil, J.M., 2014. Solar energy resource assessment in Chile: satellite estimation and ground station measurements. *Renewable Energy* 71, 324–332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.013>
114. Gapon S.V., Batlev N.N., «Defining the optimal location of alternative energy (solar and wind), (the Crimea as an example)» // *Geographical and geocological researches of Ukraine and adjacent territories*, vol. 1, DIP, 2013, pp. 492 – 497.
115. Gautier, C., Diak, G., Masse, S., 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteorol.* 19, 1005–1012.

116. Gomez A, Zubizarreta J, Rodrigues M, Dopazo C, Fueyo N. An estimation of the energy potential next term of agro-industrial residues in Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 2010;54(11):972–84.
117. Gormally A.M., Whyatt J.D., Timmis R.J. et.al. A regional-scale assessment of local renewable energy resources in Cumbria, UK // *Energy Policy* 50 (2012) 283–293.
118. Hall I.; Prairie R.; Anderson H.; Boes E. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations. SAND78-1601. – Sandia National Laboratories. Al-buquerque. 1978.
119. Hernandez, Gordillo G., Vallejo W. Predicting the behavior of a grid-connected photovoltaic system from measurements of solar radiation and ambient temperature// *Applied Energy*. 104 (2013). 527–537.
120. Ineichen, P., 2014. Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. *Energy Procedia* 48, 1586–1596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.179>.
121. Kiseleva S., Rafikova J. and Shakun V. Estimating Renewable Energy Resources of Russia: Goals and Perspectives // *EPJ Web of Conferences*. – Vol. 33 (2012).
122. Killinger S., Mainzer K., McKenna R. et.al. A regional optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives// *Energy* Volume 84, 1 May 2015, Pages 563–574.
123. Milbrandt A., Jarvis E.. *Resource Evaluation and Site Selection for Microalgae Production in India* (2010).
124. Perez R., Ineichen P., Moore K., Marek K., Chain C., George R. and Vignola F. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation *Solar Energy* Vol. 73, No. 5, pp. 307–317, 2002.
125. Perez, R., Kivalov, S., Zelenka, A., Schlemmer, J., Hemker Jr., K., 2010. Improving the performance of Satellite-to-Irradiance models using the satellite’s infrared sensors. In: *Proceedings of: ASES Annual Conference, Phoenix, Arizona, USA*.
126. Perez, R., Schlemmer, J., Hemker, K., Kivalov, S., Kankiewicz, A., Gueymard, C.A., 2015. *Satellite-to-irradiance modeling – a new version*

- of the SUNY model. In: Proceedings of Proc. of 42nd IEEE PV Specialists Conference, New Orleans, LA.
127. Perry, M. & D. Hollis (2005). The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK. *International Journal of Climatology* 25, pp. 1041-1054.
  128. Pinker, R. T., Laszlo I. Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale. // *Journal of Applied Meteorology*. 1992/ V. 31. PP. 194-211.
  129. Polo J., Wilbertet S. et al. Preliminary survey onsite-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets // *Solar Energy* 132 (2016) 25–37.
  130. Schwarb, M. (2001). The Alpine Precipitation Climate. Evaluation of a High-Resolution Analysis Scheme Using Comprehensive Rain-Gauge Data. *Zuercher Klimaschriften* 80.
  131. Sengupta, M., Habte, A., Kurtz, S., Dobos, A., Wilbert, S., Lorenz, E., Stoffel, T., Renne, D., Gueymard, C., et al., 2015. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. Golden, CO, NREL/TP-5D00-63112.
  132. Smith, G.L., Wilber A.C., Gupta S.K., Stackhouse P.W. Surface Radiation Budget and Climate Classification. // *Applied Optics*. 2002. V. 15. PP. 1175-1188.
  133. Sumathi V.R., Natesan Usha, Chinmoy Sarkar. Gis-Based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill// *Waste Management* 28 (2008) 2146–2160
  134. Szentimrey, T., Z. Bihari & S. Szalai (2007). Comparison of Geostatistical and Meteorological Interpolation Methods (What is What?). In: H. Dobesch et al (Ed.). *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology*. pp. 45-56. London: ISTE Ltd.
  135. Tveito, O.E. (2007). The Developments in Spatialization of Meteorological and Climatological Elements In: H. Dobesch et al (Ed.) *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology* pp. 73-86. London: ISTE Ltd.

136. Voivontas D, Assimacopoulos D, Mourelatos A, Corominas J. Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system // *Renew. Energy* 1998; 13:333-344.
137. Wessel, P. (2008). *The Generic Mapping Tools*. [Режим доступа: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>].
138. Wigley H.L., Ramsdell J.V., Orgill M.M., Drake R.L. *Siting handbook for small wind energy conversion systems*. US DOE. Battelle, 1980.
139. Yohanis, Y.G. Popel O.S., Frid S.E., Norton, B. The annual number of days that solar heated water satisfies a specified demand temperature // *Solar Energy*. – 2006. – V. 80. No. 8. – PP. 1021–1030.
140. База данных ERA Interim <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>
141. База данных реанализа Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA-2; <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>)
142. База данных NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
143. База данных NCEP/NCAR Reanalysis Project <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
144. База данных показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst>
145. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy).
146. Бюллетень Росстата «Производство продукции животноводства и поголовье скота в хозяйствах всех категорий за январь-сентябрь 2016 года» [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy](https://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy)
147. Картографический веб-сервис «OpenStreetMap». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.openstreetmap.org/>

148. Методика определения составляющих базы данных NASA POWER Release 8.0.1 (with GIS Applications) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://power.larc.nasa.gov/documents/POWER\\_Data\\_v9\\_methodology.pdf](https://power.larc.nasa.gov/documents/POWER_Data_v9_methodology.pdf)
149. Проекты программы uP\_running.[Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.up-running.eu/related-projects>
- 150.Официальный сайт ВНИГМИ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.ru/>
- 151.Официальный сайт Международного агентства по возобновляемой энергетике IRENA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://globalatlas.irena.org>
- 152.Официальный сайт Мирового Центра Радиационных Данных, лаборатории Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, Федеральной Службы России по Гидрометеорологии и Мониторингу Окружающей Среды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>
- 153.Официальный сайт Национальной лаборатории возобновляемой энергии США. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/gis/about.html>
- 154.Официальный сайт 3TIER. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.3tier.com](http://www.3tier.com)
- 155.Официальный сайт Meteororm <https://meteororm.com/>
- 156.Официальный сайт SolarGIS. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://solargis.info/imaps/>
- 157.Официальный сайт партнерства ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esmap.org/node/70853>
- 158.Сельское хозяйство Волгоградской области. Агентство инвестиционного развития Волгоградской области, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airvo.ru/invest/articles/87/>
- 159.Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Волгоградской области – Волгоградстат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://volgstat.gsk.ru/>

160. Федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИП ТП). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fgis.minregion.ru/>
161. ESRI (2008). ESRI GIS and Mapping Software. [Электронный ресурс]. – 2010-2015 – Режим доступа: <http://www.esri.com/>
162. PRISM (2008). PRISM Group. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.prism.oregonstate.edu/>
163. PVStream [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pvstream.com/>
164. RETScreen International. Renewable energy decision support center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.retscreen.net>
165. Swiss Wind Power Data Website. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wind-data.ch>
166. ThermoGIS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.thermogis.nl/en>
167. TRNSYS – The Transient System Simulation Program. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>

*Научное издание*

**Киселева** Софья Валентиновна, **Рафикова** Юлия Юрьевна,  
**Андреевко** Татьяна Ивановна, **Новаковский** Богуслав Августович,  
**Прасолова** Анна Ивановна

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Коллективная монография**

Компьютерная вёрстка *Ю.Ю. Рафиковой*

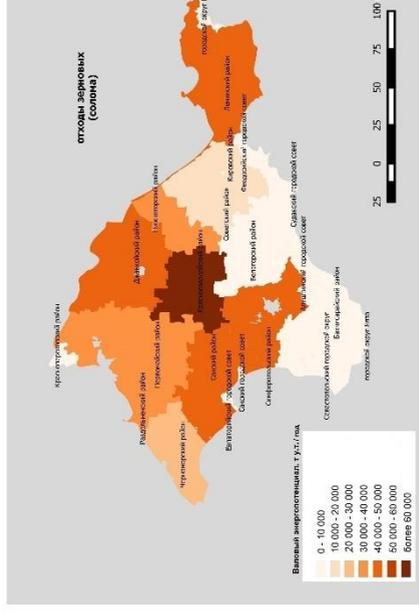
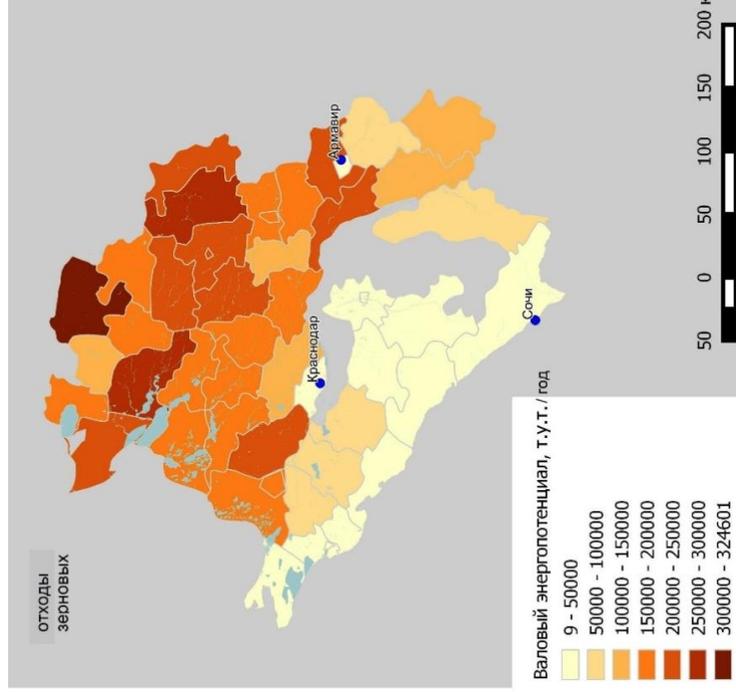
Согласно Федеральному закону РФ от 29.12.2010 № 436-ФЗ  
данная продукция не подлежит маркировке

Подп. в печать 25.09.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 11,3. Усл. изд. л. 7,9.  
Тираж 500 экз. Заказ № Т-088-19.

Издательство «Наука»  
109117, г. Москва, ул. Окская, д. 20, корп. 2, пом. VI

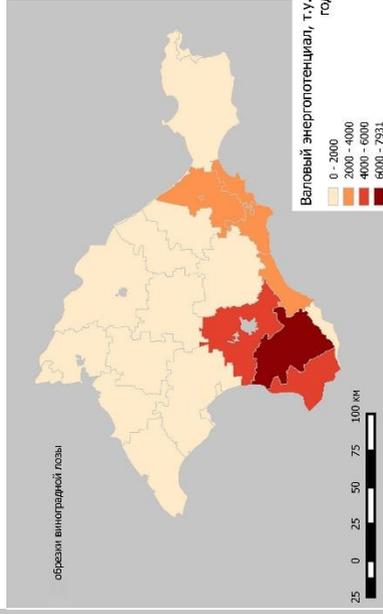
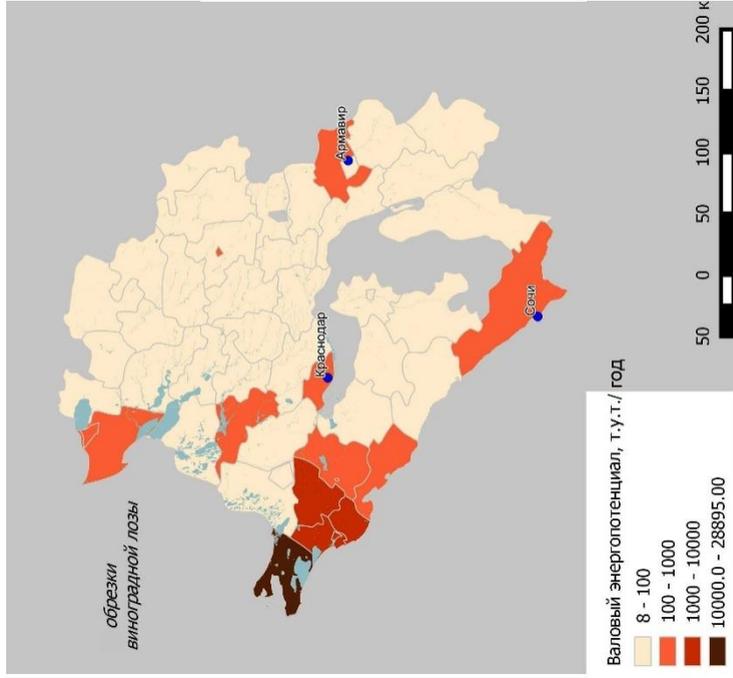
Отпечатано с материалов, предоставленных автором,  
в типографии издательства.

# Приложения

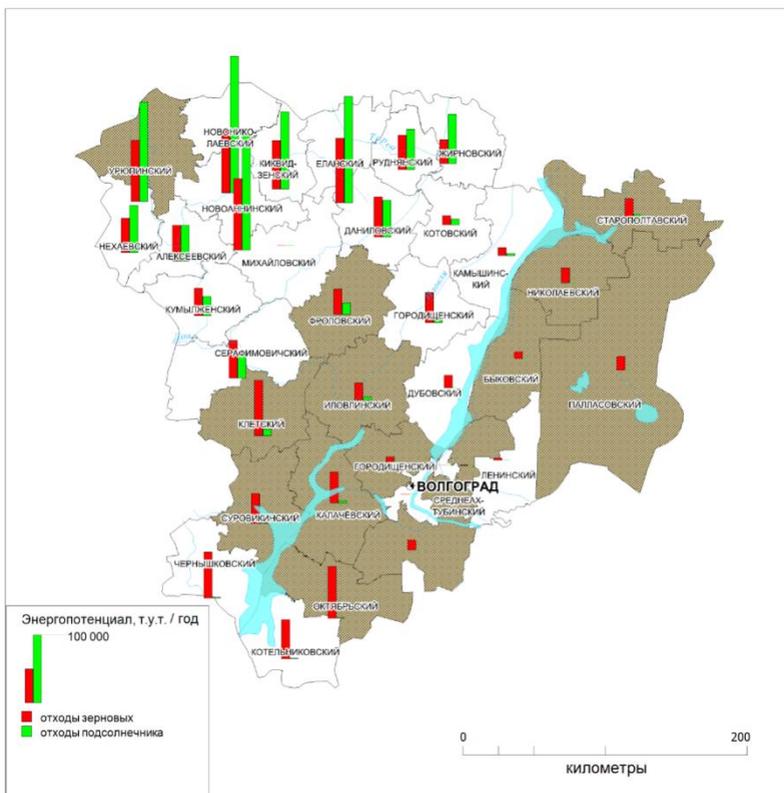


Приложение 1. Валовый энергетический потенциал отходов зерновых (соломы) (Краснодарский край и республика Крым)

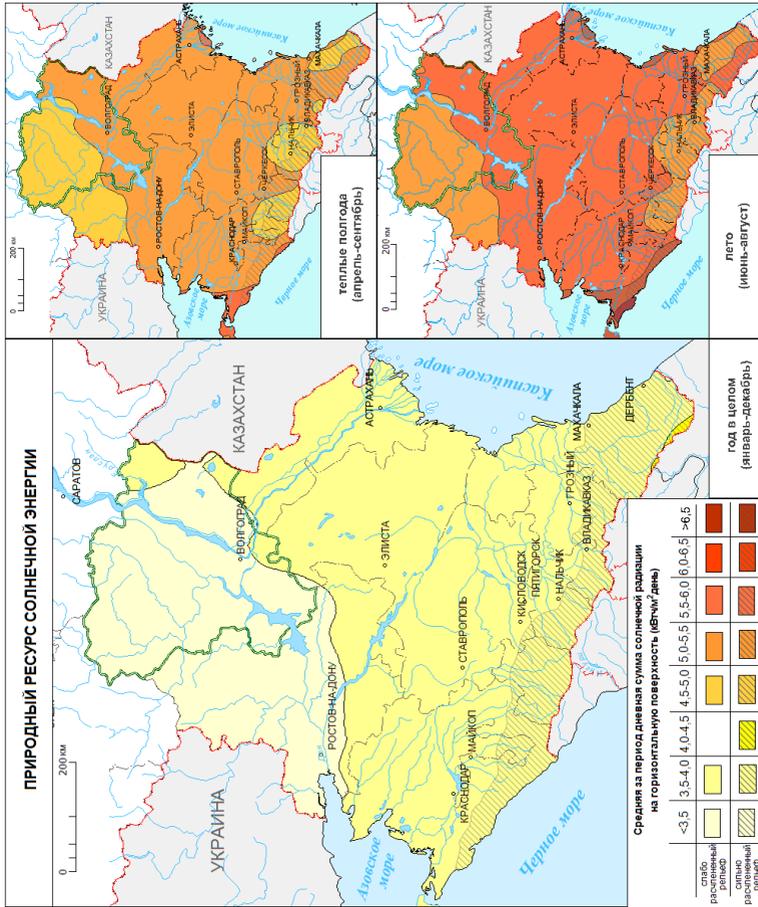




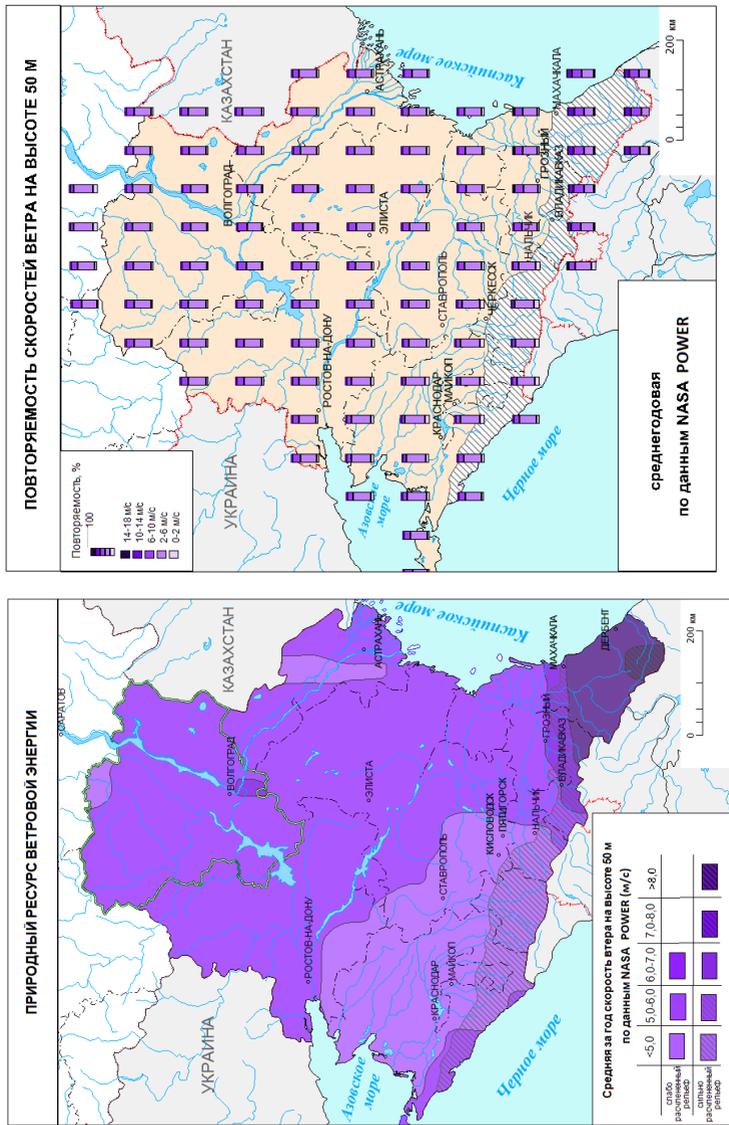
**Приложение 3.** Энергетический потенциал обрезков виноградной лозы  
(республики Дагестан и Крым, Краснодарский край)



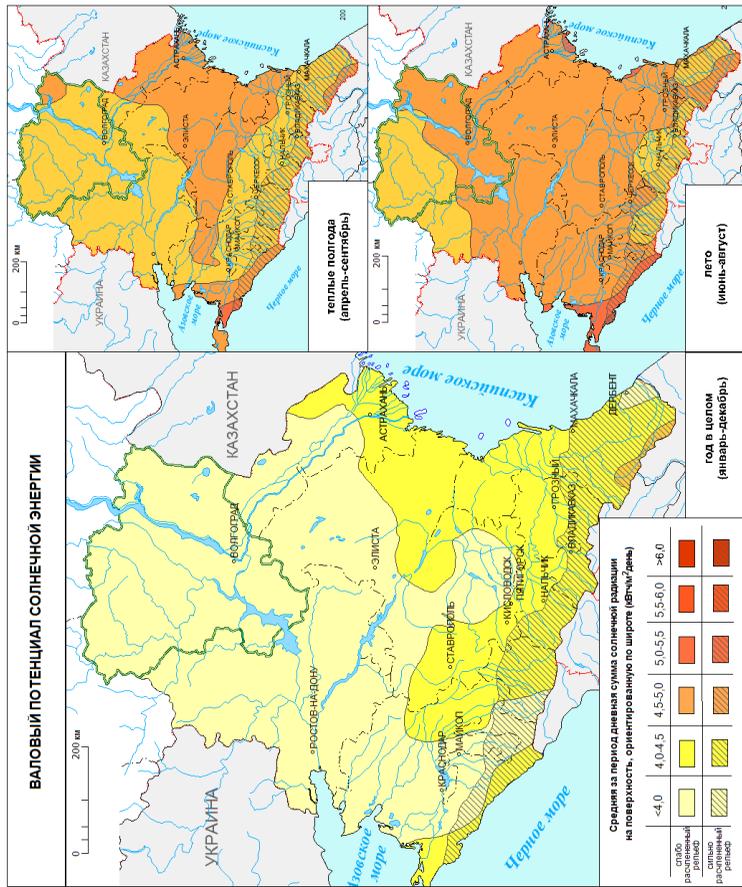
**Приложение 4.** Комплексная карта валового энергетического потенциала биоэнергетики различных типов для территории Волгоградской области (штриховкой отмечены районы со значительными по величине отходами животноводства)



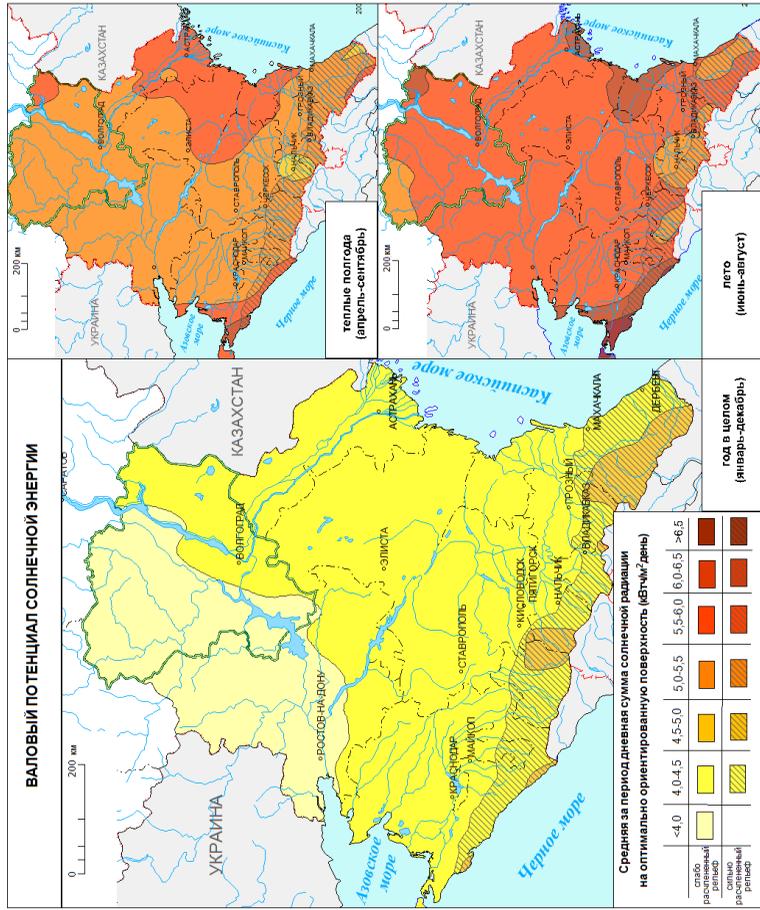
**Приложение 5. Природный ресурс солнечной энергии территории Юга России.**



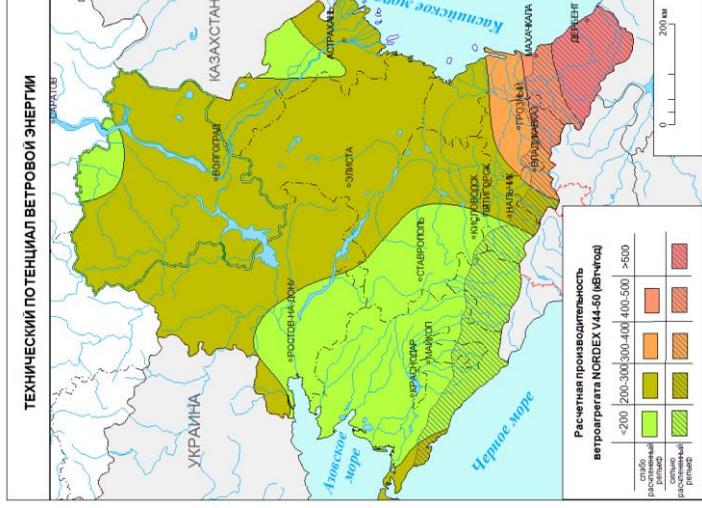
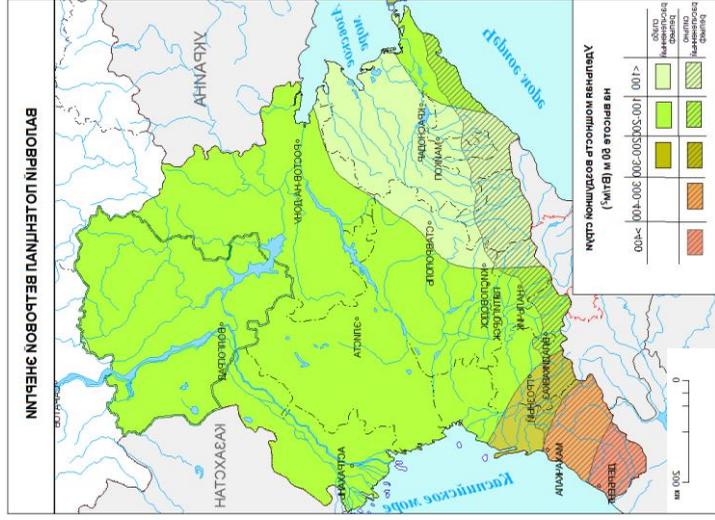
**Приложение 6.** Природный ресурс энергии ветра территории Юга России. Слева: скорость ветра на высоте 50 м, справа: повторяемости средних скоростей ветра на высоте 50 м (по данным NASA POWER)



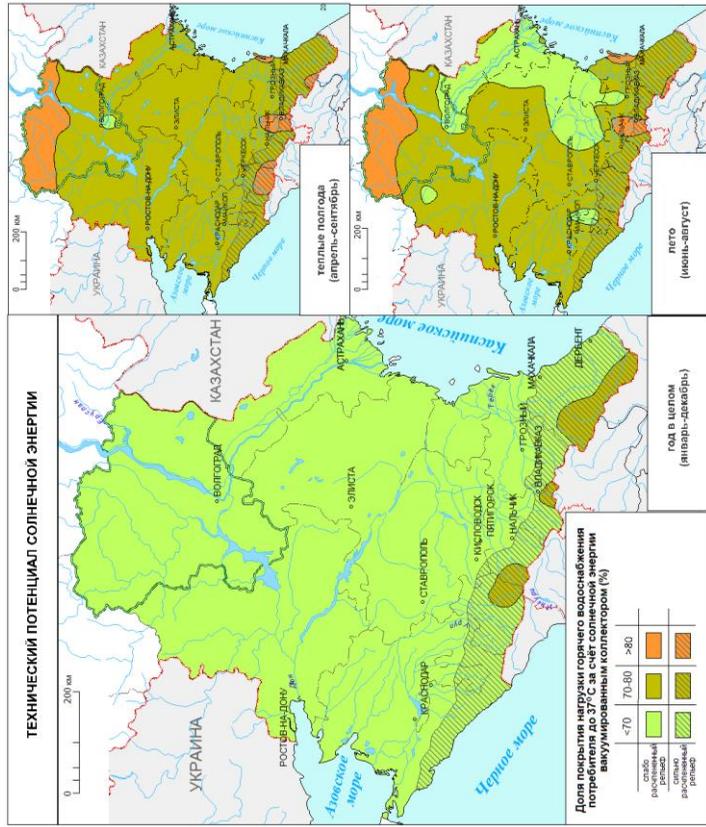
Приложение 7. Валовый потенциал солнечной энергии территории Юга России



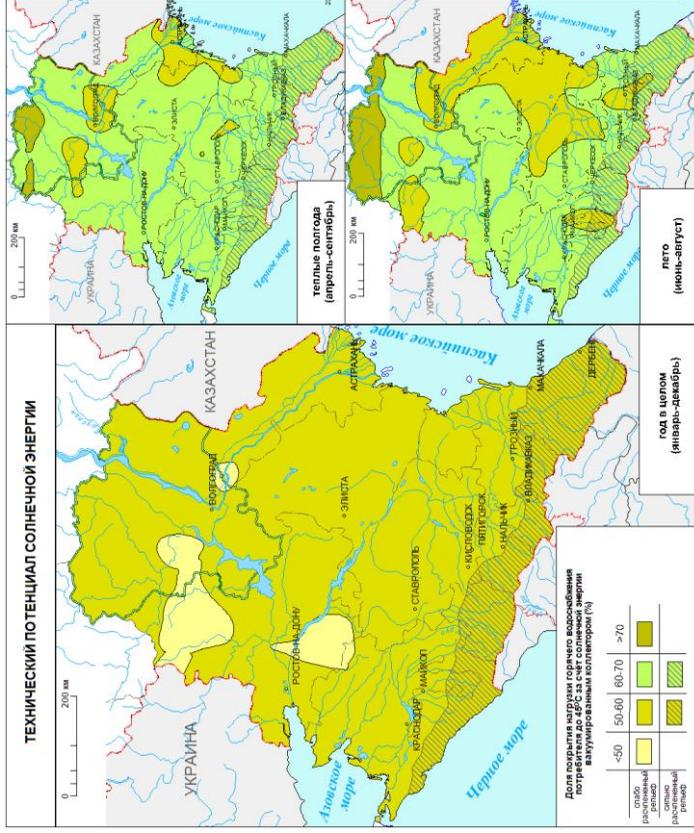
**Приложение 8.** Валовый потенциал солнечной энергии территории Юга России.



**Приложение 9.** Слева: валовый потенциал ветровой энергии территории Юга России. Справа: Технический потенциал использования ветровой энергии ветроустановкой NORDEX N27-50 для территории Юга России.

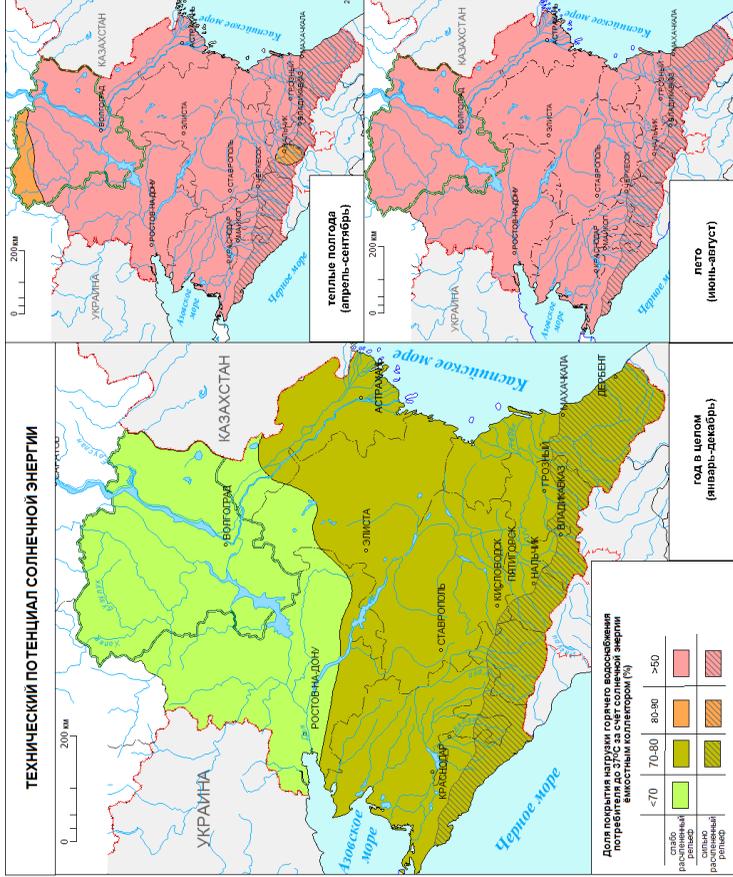


**Приложение 10.** Технический потенциал использования солнечной энергии вакуумированным коллектором площадью  $2\text{ м}^2$  для территории Юга России. Доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения потребителя до  $37^\circ\text{C}$ .

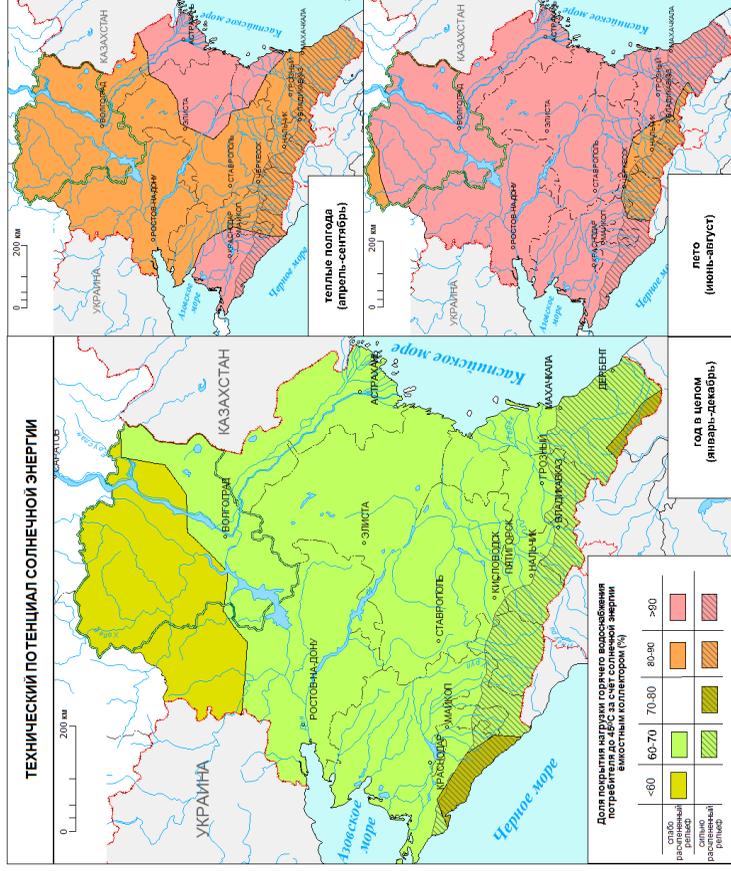


**Приложение 11.** Технический потенциал использования солнечной энергии вакуумированным коллектором площадью  $2\text{ м}^2$  для территории Юга России. Доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения потребителя до  $45^\circ\text{С}$ .





**Приложение 13.** Технический потенциал использования солнечной энергии ёмкостным коллектором площадью 2м<sup>2</sup> для территории Юга России. Доля покрытия нагрузки горячей воды потребителя до 37°C.



**Приложение 14.** Технический потенциал использования солнечной энергии ёмкостным коллектором площадью  $2\text{ м}^2$  для территории Юга России. Доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения потребителя до  $45^\circ\text{C}$ .



## Приложение 16

Ранжирование факторов по степени влияния на решение о размещении  
объекта ВИЭ на выбранной территории

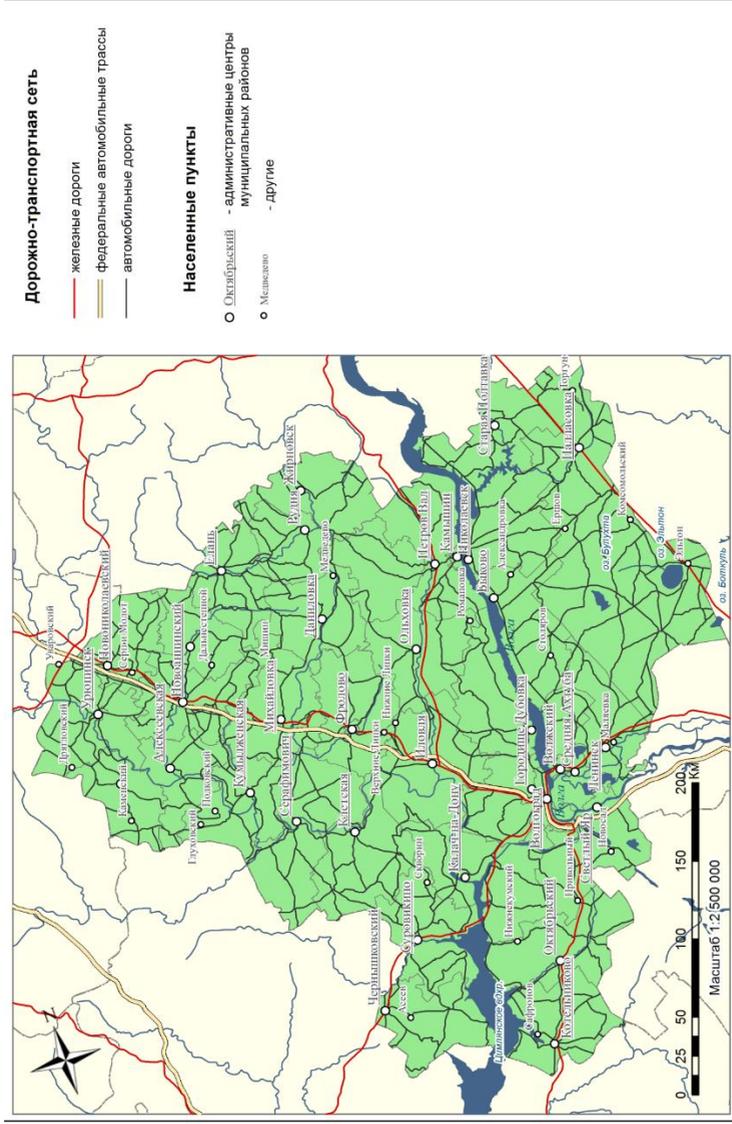
Степень ограничения	Баллы	Влияние на решение о размещении объекта
<b>строгое ограничение</b>	3	строительство объекта на ВИЭ здесь полностью запрещено
<b>среднее ограничение</b>	2	строительство теоретически запрещено, но может быть реализовано, если положительное воздействие объекта от объекта будет достаточно высоко.
<b>слабое ограничение</b>	1	строительство может быть осуществлено после более детальной оценки воздействия объекта на окружающую среду

Полный перечень ограничивающих факторов, учтенных при районировании  
Волгоградской области по степени пригодности для размещения объектов  
солнечной и ветровой энергетики

№	Ограничивающий фактор	Форма отображения	Уровень ограничения (в баллах)	Буферная зона, м
1	Природные парки	полигон	2	
2	Природные заказники	полигон	2	
3	Охраняемые ландшафты	полигон	2	
4	Памятники природы	полигон	2	
5	Земли лесного фонда	полигон	2	

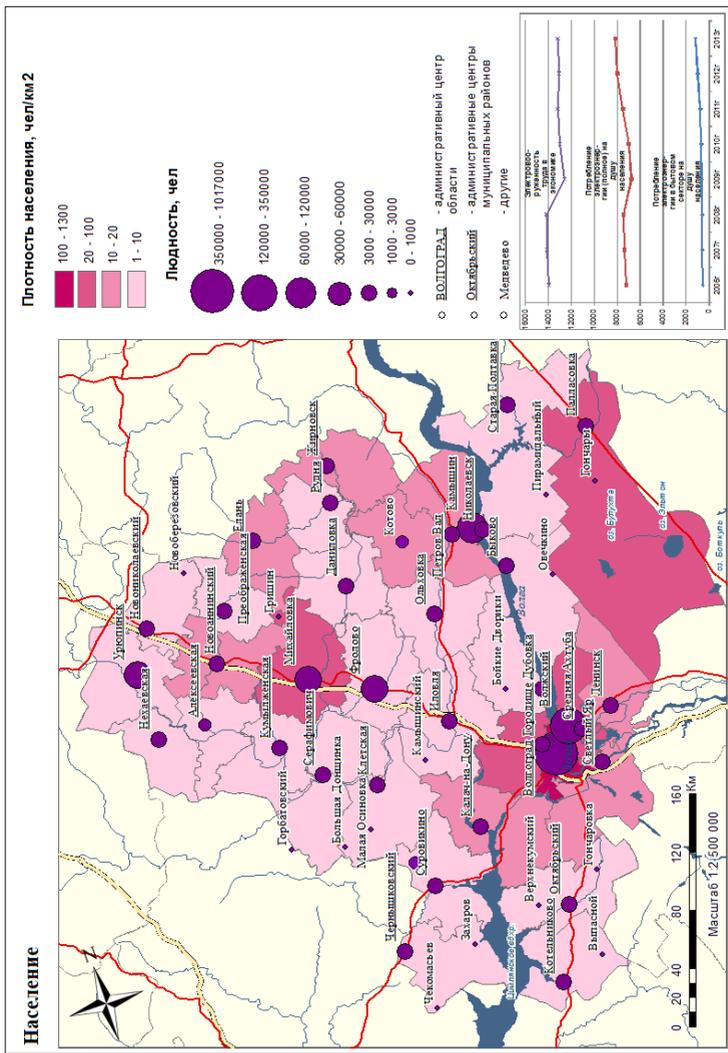
6	Районы с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями (склоны)	полигон	3	
7	Нелинейные гидрологические объекты	полигон	3	
8	Линейные гидрологические объекты	линия	3	
9	Ключевые орнитологические районы	полигон	2	150
10	Территории объектов министерства обороны	полигон	2	
11	Пашни, сенокосы	полигон	1	
12	Леса, выгоны и пастбища, пески, сады	полигон	2	
13	Территории населенных пунктов	полигон	1	
14	Линии автодорог	линия	3	40
15	Линии железных дорог	линия	3	40



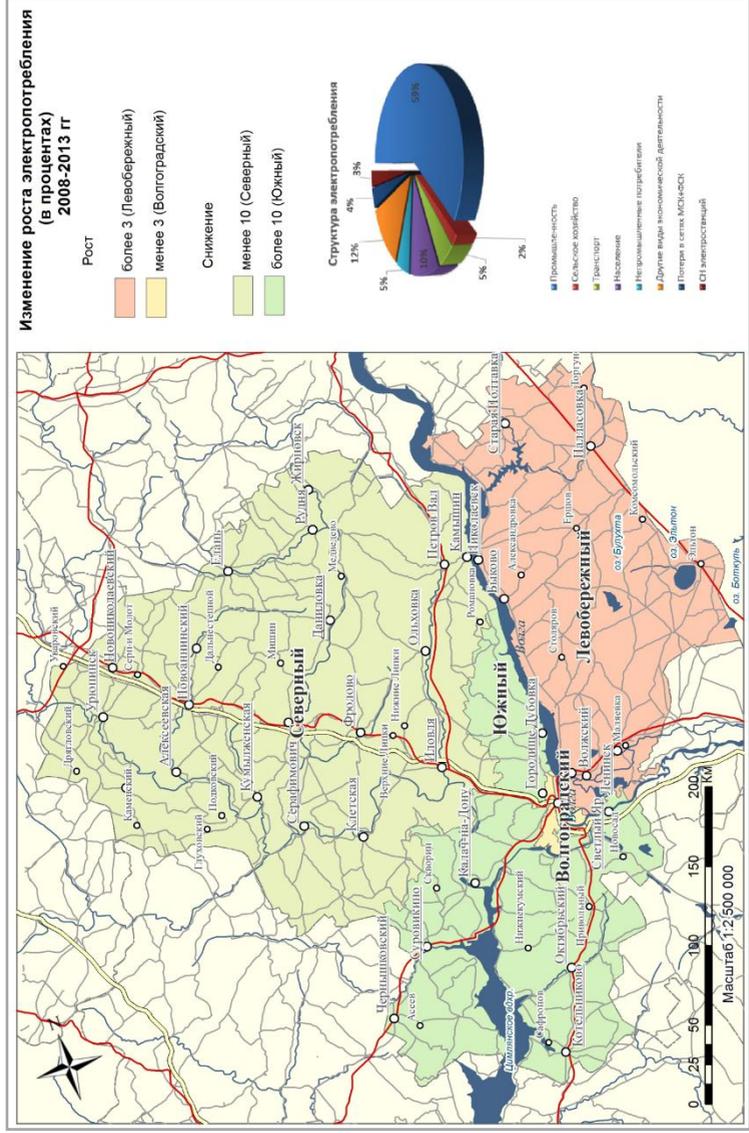


Приложение 18. Карта дорожно-транспортной сети Волгоградской области.

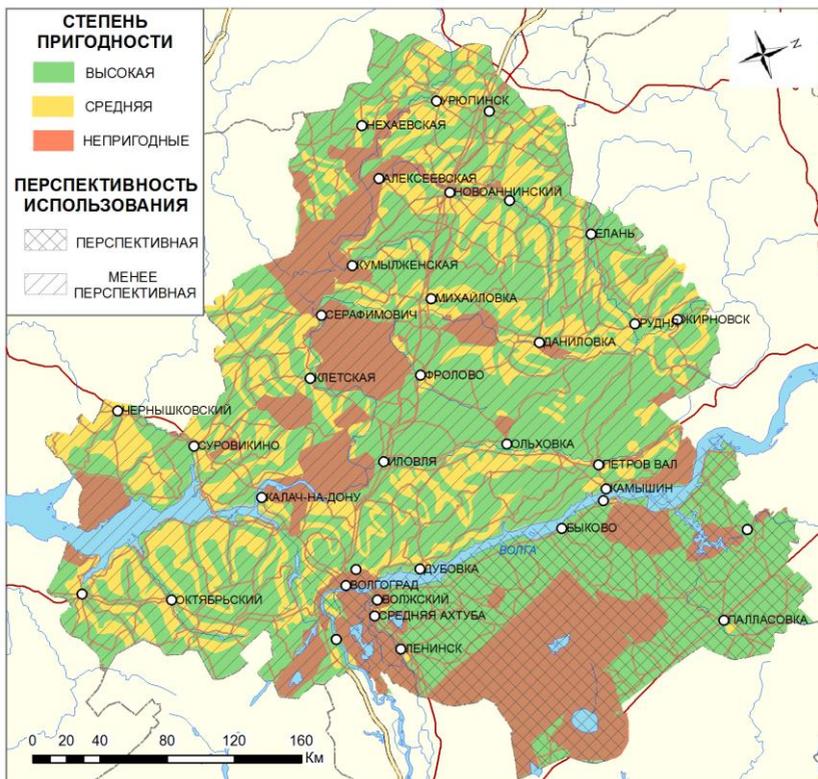




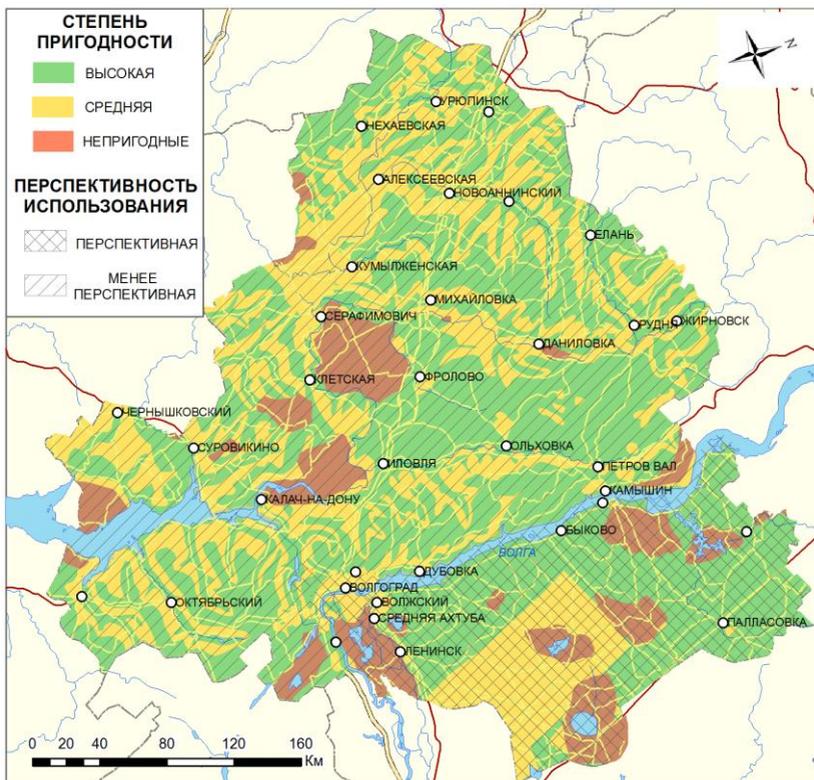
Приложение 20. Карта населения Волгоградской области.



Приложение 21. Карта динамики изменения электропотребления Волгоградской области за 2008–2013 гг.



**Приложение 22.** Карта пригодности использования территории Волгоградской области для размещения крупных объектов солнечной и ветровой энергетики.



**Приложение 23.** Карта пригодности использования территории Волгоградской области для размещения мелких объектов солнечной и ветровой энергетики.

