

**Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова**

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Научно-исследовательская лаборатория  
возобновляемых источников энергии**

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
РЕСУРСЫ: ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ,  
ПЕРСПЕКТИВЫ**



**Коллективная монография**

*Под редакцией К.С. Дегтярева*

УДК 911:3.33

ББК 26.8

ISBN

**Возобновляемые энергетические ресурсы: история, проблемы, перспективы.** / Под редакцией К.С. Дегтярева. Коллективная монография. – М.: «КДУ», 2020. – 92 с.

*Коллектив авторов:*

Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А.

Книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся проблематикой возобновляемых источников энергии. В работе представлена история, естественнонаучные, физико-географические основы, методология, проблемы и перспективы изучения и использования возобновляемых энергоресурсов. Книга может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов, обучающихся по географическим, экологическим, энергетическим, экономическим направлениям.

ISBN

© Коллектив авторов, 2020

© Издательство «КДУ», 2020

# ОТЛАВЛЕНИЕ

**Введение ... 5**

## **Глава I. История и основные тенденции использования ВЭР**

История и современное состояние использования ВЭР ... **8**

Основные тенденции использования ВЭР ... **11**

## **Глава II. Изучение и методика оценки потенциала ВЭР**

Понятие потенциала ВЭР, виды потенциалов ... **16**

Методики оценки валового потенциала ВЭР ... **19**

Оценки величины валового потенциала ВЭР в мире ... **24**

Оценки технического и других потенциалов ВЭР ... **26**

## **Глава III. История исследования ВЭР**

Открытия и изобретения в энергетике, создание технологий использования энергии ... **32**

Исследования и развитие технологий в гидроэнергетике, ветроэнергетике, солнечной энергетике ... **39**

Система наблюдений за природной средой, географические исследования ВЭР ... **47**

## **Глава IV. География использования и перспективы изучения ВЭР**

География мирового производства электроэнергии на ВЭР ... **53**

География мировой гидроэлектроэнергетики ... **54**

Энергетика на ВЭР – закономерности размещения ... **57**

Экономические и технологические аспекты изучения ВЭР ... **63**

## **Глава V. Технологический прогресс в возобновляемой энергетике**

Элементы технологического форсайта в области возобновляемых источников энергии для промышленной политики России ... **70**

Национальные цели развития возобновляемой энергетики в России ... **75**

К низкоуглеродному будущему ... **81**

**Заключение ... 84**

**Библиографический список ... 86**

## Введение

Возобновляемые энергетические ресурсы (ВЭР) обусловлены наличием возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Одно из определений ВИЭ: «источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе, а также жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества» [4].

Выделяются следующие виды ВИЭ, или возобновляемой энергии:

- Солнечная – энергия солнечного излучения;
- Ветровая – энергия движения атмосферы;
- Гидравлическая – прежде всего, под нею понимается энергия течения воды в реках, но также к ней относится приливная и волновая океаническая энергия;
- Биоэнергия – энергия живых организмов, прежде всего, растений – энергия, содержащаяся в приросте биомассы; также к биоэнергии относят отходы сельского хозяйства, лесоперерабатывающего производства, другие бытовые и промышленные отходы органического происхождения;
- Геотермальная – энергия, содержащаяся в глубинных термальных водах и горных породах.

ВИЭ обычно «противопоставляются» невозобновляемым источникам энергии и энергоресурсам, включающим ископаемые углеводороды и ядерное топливо (также ископаемый энергоресурс). С другой стороны, ВИЭ могут рассматривать-

ся в одной связке с ядерной энергией в качестве «неуглеродных» ресурсов, непосредственное использование которых не сопряжено с выбросами углекислого газа, других парниковых газов и ряда сопутствующих токсичных элементов и соединений в природную среду.

Большая часть ВИЭ привязана к геосферам Земли: ветровая – к атмосфере, гидравлическая – к гидросфере, биологическая – к биосфере, геотермальная к литосфере. Данные ВИЭ можно также называть источниками геосфер или геосред.

При этом, ветровую, гидравлическую, биологическую и, отчасти, геотермальную (энергию верхних слоёв грунта, прогреваемых за счёт солнечного тепла), можно рассматривать как производные от солнечной энергии. Солнце нагревает земную поверхность, что обуславливает движение воздушных масс (ветровая энергия), вызывает испарение воды и её круговорот в природе (создавая гидравлическую энергию), а также является источником роста живых организмов.

Возобновляемые энергоресурсы (ВЭР), в связи с этим можно рассматривать как энергетический потенциал, содержащийся в данных источниках, запасы данной энергии. Энергетический потенциал ВИЭ – сложное понятие, включающее ряд составляющих, подробнее оно рассматривается в следующих разделах данной работы.

Исследование ВЭР является сугубо прикладной задачей, подчинённой цели обеспечить использование ВЭР в экономике. Само по себе изучение ВЭР неотделимо от изучения возможностей их использования и включает три основных аспекта:

- Естественнаучный, включая физико-географический – изучение природной среды;
- Инженерно-технологический – изучение и развитие технологий;
- Экономический, включая экономико-географический – изучение разных аспектов экономики, включая территориальный, с целью определения

---

экономической эффективности использования ВИЭ в различных условиях.

Изучение ВЭР – междисциплинарная область, находящаяся на стыке естественных и гуманитарных наук. Кроме того, использование ВЭР, имеющее давнюю историю, предшествует систематическому изучению природной среды и общества. Также следует отметить, что неотъемлемой составной частью изучения ВЭР являются технологические разработки, направленные на их более эффективное использование. В связи с этим, в работе последовательно представлены:

- история использования ВЭР и их роль в современной экономике;
- методики оценок и оценки объёмов ВЭР;
- история накопления научных знаний, технологических идей и разработок, дающих возможность использования ВЭР;
- история изучения свойств природной среды, продуцирующей ВЭР.

Также даётся оценка перспектив использования ВЭР и обзор перспективных направлений исследований в данной области.

\

## **Глава I. История и основные тенденции использования ВЭР**

### *История и современное состояние использования ВЭР*

Использование ВЭР имеет давнюю историю, сопоставимую с историей человеческой цивилизации как таковой. Практически всегда энергия текущей воды использовалась для перемещения людей и грузов по рекам. С древнейших времён известны парусные суда, ветряные и водяные мельницы. Наконец, для отопления жилья и приготовления пищи служило архаичное биотопливо – дрова, кизяки, и т.п.

Один из известных и, без преувеличения – грандиозных, для своего времени, опытов использования ВЭР, а именно, энергии ветра – осушение озёр и болот в Голландии с помощью ветряных мельниц в XVII веке. Ветряные мельницы конструкции Яна Адриаанссона (далее получившей известность как «голландская мельница») позволили осушить 27 озёр в стране. В русских летописях ещё за XIV век зафиксированы водяные мельницы на реках Москве, Яузе, Неглинной, Ходынке, служившие не только для помола муки, но и на промышленных предприятиях того времени – сафьянном, пушечном, металлургическом [15].

Позже использование ВЭР было в значительной степени вытеснено углём, далее нефтью, газом, атомной энергией. В то же время, оно никогда не прекращалось, а примерно с XIX века началось развитие энергетики на основе ВИЭ в современном виде, когда появились первые гидроэлектростанции (ГЭС) и геотермальные станции (ГеоЭС).

Активное же продвижение энергетики на основе ВИЭ в господствующем ныне понимании и с определённым политико-идеологическим наполнением началось примерно в 1970-е гг.

В данном случае речь идёт, главным образом, об освоении, уже на современном технологическом уровне, энергии ветра, солнца, биомассы, морских приливов и волн, геотермальной энергии, тепла поверхностных слоёв земли, гидроэнергии малых рек.

Катализаторами современного этапа развития энергетики на ВИЭ, или возобновляемой энергетике, стали нефтяной кризис 1970-х гг., а также рост экологических и ресурсных проблем и обострение их восприятия, выразившееся, в частности в представлениях о «Пределах роста» и концепции «Устойчивого развития».

Возобновляемая энергетика рассматривалась и рассматривается в качестве инструмента:

- Ресурсосберегающего и экологически безопасного энергоснабжения населения и хозяйства;
- Снижения энергетической зависимости стран – импортеров ископаемых энергоресурсов;
- Рационального использования энергоресурсов территорий;
- Обеспечения более «справедливого» доступа пользователей к энергоресурсам (учитывая более равномерный характер распределения ВИЭ по земной поверхности по сравнению с ископаемыми энергоресурсами);
- Инновационного и социально-экономического развития, создания новых отраслей экономики и рабочих мест.

С использованием ВИЭ производится электроэнергия, тепло, транспортное топливо. В то же время, за последние полвека их доля в мировом энергобалансе принципиально не увеличилась (табл. 1), хотя в абсолютных единицах их потребление выросло более, чем вдвое, а потребление отдельно взятых солнечной, ветровой и геотермальной энергии (в табл. – «прочее») выросло почти в 50 раз в абсолютном выражении и в 15 раз (с 0,1% до 1,5%) – доля в энергобалансе.

Таблица 1. Изменение доли энергоресурсов разного типа в мировом энергетическом балансе с 1973 по 2015 год [59]

Энергетический ресурс	1973	2015
Невозобновляемые (ископаемые) энергоресурсы:	<b>87,6%</b>	<b>86,3%</b>
Газ	16,0%	21,6%
Нефть	46,2%	31,7%
Уголь	24,5%	28,1%
Атомная энергия	0,9%	4,9%
Возобновляемые энергоресурсы:	<b>12,4%</b>	<b>13,7%</b>
Гидроэнергия	1,8%	2,5%
Биотопливо и отходы	10,5%	9,7%
Прочее	0,1%	1,5%
Всего (млн. тонн нефтяного эквивалента)	<b>6 101</b>	<b>13 647</b>

С 2007 по 2017 год объём установленных мощностей электростанций на основе ВИЭ в мире вырос:

- солнечная – с 9 ГВт до 390 ГВт [57],
- ветровая – с 91 ГВт до 514 ГВт [58],
- биоэнергия – с 51 ГВт до 109 ГВт [53],
- геотермальная – с 9 ГВт до 12 ГВт [54],
- гидроэнергетика – с 834 ГВт до 1116 ГВт [55],
- океаническая (приливо-волновая) – с 242 МВт до 526 МВт [56].

Производство электроэнергии выросло за 2007-2017 [27]:

- на солнечных станциях – с 8 ТВтч до 443 ТВтч в год;
- на ветростанциях – со 171 ТВтч до 1123 ТВтч в год.

Таким образом, доля солнечной и ветровой энергии в мировом производстве электроэнергии выросла за последнее десятилетие с менее 1% до величины около **6,5%**. Ещё 16% приходится на гидроэнергетику (доля которой в мировом

производстве электроэнергии практически не растёт в последние годы и десятилетия) и менее 1% - на прочие виды. Общая доля ВИЭ в мировом производстве электроэнергии, таким образом, составляет около **23%** (при этом  $\frac{3}{4}$  приходится на гидроэнергетику).

### ***Основные тенденции использования ВЭР***

Таким образом, процесс развития энергетики на основе ВИЭ носит достаточно сложный и разнонаправленный характер.

С одной стороны, доля ветровой и солнечной энергетики в мире растёт. С другой стороны, в мире практически не снижается доля ископаемых углеводородов в энергобалансе, что, вероятно, связано с двумя главными причинами:

1. Спад в атомной энергетике с 2000-х гг., в значительной степени связанный с авариями на АЭС в Чернобыле (1986) и Фукусиме (2011), компенсируется, большей частью, энергообеспечением за счёт ископаемых энергоносителей;

2. В ряде случаев, прежде всего – в развивающихся странах, происходит замещение архаичных энергоносителей (дров и т.п.) энергетикой на основе ископаемых углеводородов, т.е. они проходят в настоящее время те же стадии, что и западные страны и Россия 50-100 лет назад.

Кроме того, с середины – конца 2000-х гг. обозначилось снижение темпов роста ветровой и солнечной энергетики [12], продолжающееся и во втором десятилетии XXI века.

В дополнение к этому, при оценке перспектив, возможностей и экологической безопасности энергетики на ВИЭ появляются критическая составляющая – в частности, активнее говорят о «непреднамеренных последствиях» (unintended consequences) возобновляемой энергетики [21, 25].

По ряду прогнозов, в ближайшее десятилетие энергетика на ВИЭ будет развиваться менее высокими темпами, чем ранее. Рост возобновляемой энергетики будет связан, главным образом, с новыми территориями – такими, как Китай и ряд развивающихся стран, а также Россия.

В России и СССР развитие современной энергетики на основе ВИЭ было тесно связано с реализацией плана ГОЭЛРО [11].

За период 1920-х – 1960-х гг. был построен ряд крупных гидроэлектростанций (ГЭС) и порядка нескольких тысяч малых ГЭС, ряд электростанций, работающих на торфе, ряд ветроэлектростанций (ВЭС). Начались разработки в солнечной энергетике, в частности, солнечными батареями был оснащён ещё первый искусственный спутник Земли в 1957 году [23], и биоэнергетике нового поколения [18]. В 1960-е годы были построены первые геотермальные электростанции (ГеоЭС) на Камчатке, при этом впервые в мире была использована технология бинарного цикла. Всё это базировалось на отечественных технологиях и оборудовании, и в тот период СССР входил в число мировых лидеров развития и разработок в сфере ВИЭ.

Начиная с 1960-х, во многом – в связи с развитием атомной энергетики, открытием и разработкой западносибирских нефтегазовых месторождений, а также строительством ряда крупных ГЭС, энергетика на ВИЭ отошла на второй план, а число малых ГЭС даже сократилось с нескольких тысяч до нескольких сотен [11].

В то же время, разработки на уровне НИОКР продолжались. Отметим, что в западных странах в тот период массовое строительство солнечных и ветростанций также пока не началось. Ускоренное развитие, прежде всего – ветровой, несколько позже – солнечной энергетики, в мире началось с 1990-х – начала 2000-х гг.

Именно эти годы оказались для возобновляемой энергетики в России «потерянными» в силу масштабного экономи-

ческого кризиса 1990-х. Отдельные проекты в данной сфере осуществлялись и в 1990-е – например, строительство ветропарка в Калининградской области. Но, в целом, Россия за 20 постсоветских лет существенно отстала от западных, а позже – и от восточноазиатских, стран по установке генерирующих мощностей на основе ВИЭ, инвестициям в ВИЭ, производству оборудования для ВИЭ (некоторые производства – например, кремния для солнечных батарей, были свёрнуты именно в постсоветское время).

В последние 10 лет в нашей стране наблюдается возобновление интереса к ВИЭ. Принят ряд законодательно-нормативных документов, стимулирующих развитие возобновляемой энергетики [38], реализуется ряд крупных проектов, несколько крупных ветропарков (Ульяновская область, новый ветропарк в Калининградской области) и солнечных станций (в Оренбургской области, Астраханской области, Республике Алтай) уже пущены в эксплуатацию. Общий объём проектов со сроками завершения до 2023 года составляет по солнечным и ветростанциям более 4 ГВт [35]. На данный момент наиболее быстро развивается солнечная фотовольтаическая энергетика - по состоянию на конец 2018 года в России уже введено около 900 МВт СЭС в 12 субъектах РФ, главным образом – на юге европейской части России и Южном Урале [7].

Одновременно идёт модернизация и строительство ряда малых ГЭС и геотермальных станций.

Проекты ВИЭ в нашей стране также привязаны, главным образом, к зонам максимального природного потенциала ВИЭ. В частности, проекты солнечной энергетики реализуются в южном поясе России – от Крыма до Забайкалья, ветроэнергетики – на юге в степной зоне (от Крыма до Поволжья) и прибрежных (причерноморской и балтийской) областях, малая гидроэнергетика – в горных районах (Кавказ, Алтай), геотермальная энергетика – на территориях с повышенной тектонической активностью (Камчатка).

Как правило, за крупными проектами ВИЭ в России стоят крупные корпорации (Росатом, Русгидро, Роснано и другие), обладающие большими финансовыми ресурсами.

Параллельно набирает популярность малая автономная энергетика на основе ВИЭ, направленная на автономное энергообеспечение небольших потребителей (отдельных частных домов и хозяйств), в ряде случаев – отрезанных от единой энергосети в силу географических, экономических и технологических причин.

Также можно отметить, что развитие энергетики на основе ВЭР коррелирует с 50-60-летними «длинными волнами» технико-экономического развития, именуемыми также циклами Кондратьева или Ван Гельдерена.

При этом, начало развития гидроэнергетики коррелирует с 3-м Кондратьевским циклом (2-я промышленная революция, табл. 2) [14].

Начало же активного роста энергетики на основе других ВИЭ в современном виде, отсчитывая от нефтяного кризиса начала 1970-х, совпадает с началом 5-го цикла Кондратьева в рамках 3-й промышленной революции и, вероятно, является одной из составляющих и даже определяющих частей данного цикла.

Таблица 2. Динамика индустриальных циклов в Западной Европе и России [2]

Промышленная революция	Кондратьевский цикл	Период времени в западных странах
Первая	2-й	1845-1891
Вторая	3-й	1891-1936
	4-й	1936-1975
Третья	5-й	1975-2024

---

Восходящая фаза в настоящее время сменяется нисходящей с замедлением темпов роста и вероятной перегруппировкой до 2020-2030 гг. перед следующей фазой подъёма.

С высокой степенью вероятности, до середины – конца 2020-х гг. доминирующей тенденцией в энергетике на основе ВИЭ станет более осторожный и прагматичный подход с поиском оптимальных ниш развития – географических, экологических, социальных.

Отметим также, что Россия «пропустила» 5-й цикл, что, с другой стороны, даёт возможность учесть исследования имеющегося опыта и подготовки к следующей восходящей фазе уже с более высокого уровня.

В долгосрочной перспективе развитие энергетики на ВИЭ в России сохраняет актуальность, исходя из инновационной и экологической составляющей, роста потребностей в энергообеспечении и возможного дефицита углеводородного сырья.

В ближайшие годы оптимальным подходом к развитию ВИЭ в нашей стране также является избирательный, «нишевой» подход с поиском областей и точек, где генерация на основе ВИЭ является эколого- и социально-экономически целесообразной.

## **Глава II. Изучение и методика оценки потенциала ВЭР**

### *Понятие потенциала ВЭР, виды потенциалов*

Ключевым понятием при оценке ВЭР является **потенциал ВИЭ (ВЭР)**. В советской, позже – российской практике выделяются три основные категории [4] потенциала ВИЭ:

1. Валовый (теоретический, природный) – годовой объём энергии, содержащийся в данном виде ВИЭ при полном её превращении в полезно используемую энергию.

2. Технический – часть валового потенциала, преобразование которого в полезную энергию возможно при существующем уровне развития технических средств и соблюдении требований по охране природной среды.

3. Экономический – часть технического потенциала, преобразование которого в полезную используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на ископаемое топливо, тепловую и электрическую энергию, оборудование, материалы, транспортные услуги, оплату труда и т.д.

В зарубежных работах данные три потенциала также всегда присутствуют с практически идентичными по смыслу определениями. В то же время, обычно даётся более детальная типология, которая у разных авторов может быть различной (табл. 3) и, как правило, связана с аспектом, в котором проводятся исследования ВИЭ и рассматриваемыми типами ограничений развития энергетики.

В частности, М. Hoogwijk [28], в свою очередь, ссылаясь на подходы van Wijk and Coelingh [31] и Мирового энергетического совета [32], выделяет следующие типы потенциалов ВИЭ:

- Теоретический;
- Географический;
- Технический;
- Экономический;
- Практический (в оригинале – implementation potential, что можно перевести также как потенциал внедрения, реализуемый потенциал или потенциал имплементации).

Boyle [26] выделяет общий (total), технический, практический и экономический потенциал. Painuly [29], выделяют, в качестве промежуточных категорий, также технико-экономический (techno-economic) и рыночный (market) потенциал. Resch и др. [61] используют также понятия реализуемого или доступного (realisable) потенциала.

Таблица 3. Типы потенциалов ВИЭ, используемые в некоторых зарубежных исследованиях, и их определения

Потенциал	van Wijk и Coelingh, Hoogwijk, World Energy Council, 1994	Painuly, Farooq
Теоретический	Теоретический предел первичного ресурса, такого, как солнечная, ветровая или другая возобновляемая энергия	Наивысший уровень ресурсного потенциала, связанный только ограничениями природного и климатического характера
Географический	Теоретический потенциал, уменьшенный до энергии, генерируемой на территориях, рассматриваемых как доступные и пригодные для её производства	Теоретический потенциал, ограниченный ресурсами территорий, пригодных для установки данной технологии

Технический	Географический потенциал, уменьшенный на потери от конверсии первичной энергии во вторичные источники энергии	Географический потенциал, который может быть реализован при использовании технически жизнеспособных технологий, исходя из эффективности конверсии
Технико-экономический		Потенциал, который может быть полезным при применении технически и экономически жизнеспособных технологий, повсеместно используемых на конкурентных рынках
Экономический	Производная от технического потенциала при ценах, конкурентоспособных с альтернативными технологиями	Технический потенциал при конкурентоспособных уровнях затрат
Реализуемый (внедряемый, потенциал имплементации, практический)	Технический потенциал, внедряемый (пригодный к внедрению) в энергетическую систему (прим.: субсидии и другие политические меры могут повысить потенциал внедрения, но социальные барьеры могут его снизить)	

Рыночный		Общее количество возобновляемой энергии, которое может быть поставлено на рынок, принимая во внимание спрос на энергию, конкурирующие технологии, затраты и субсидии на ВИЭ и барьеры
----------	--	---

В таком, более детальном подходе, есть свои достоинства и недостатки, однако явным преимуществом является выделение в самостоятельную категорию географического потенциала [30], учитывая высокую роль географического, в том числе – пространственного, фактора для ВИЭ и развития энергетики на их основе. Понятие географического потенциала ВИЭ ещё требует более тщательной методологической проработки, а сам потенциал – более детальных исследований.

### ***Методики оценки валового потенциала ВЭР***

На первом этапе проводится оценка валового (теоретического, природного) потенциала ресурсов возобновляемой энергии. Валовый потенциал является объективной величиной. Его оценки могут различаться в зависимости от выбранной методики, технических средств и полноты информации. Его изменения могут быть связаны с изменением природных условий, в частности, погодно-климатических условий.

Другие типы потенциала зависят, прежде всего, от деятельности человека и определяются, в первую очередь, достигнутым на данный момент технологическим уровнем, экономической политикой, конкретными условиями данной тер-

ритории. В связи с этим, географический, технический, экономический потенциалы являются существенно более изменчивыми величинами по сравнению с природным потенциалом и труднее поддающимися корректному расчёту. Одно из наиболее полных описаний методики приводится в работе П.П. Безруких [4].

Для оценки валового потенциала солнечной энергии используются данные о солнечной радиации, поступающей в единицу времени на единицу земной поверхности в данной точке, местности или регионе. Информационной базой для него являются данные актинометрических наблюдений и расчётов, полученных на основе наземных и спутниковых наблюдений. Оценка валового потенциала солнечной радиации методологически наиболее проста и однозначна, хотя на локальном уровне в силу существенных различий местных условий это может стать весьма трудоёмкой задачей.

Валовый солнечный потенциал данной территории вычисляется умножением площади территории на среднегодовой приход солнечной радиации на единицу площади.

В то же время, возможны различия в оценках, связанные с методикой подсчёта, в частности, измеряется ли приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность, следящую за солнцем поверхность или под каким-либо другим углом.

В основе расчёта лежит солнечная постоянная, или поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей, за пределами земной атмосферы и на среднем расстоянии от Солнца (1 а.е.), составляющая 1367 Вт/кв.м [16].

В то же время, из-за действия земной атмосферы 1 м<sup>2</sup> поверхности Земли получает около 1000 Вт/ м<sup>2</sup> при чистой атмосфере и Солнце в положении, близком к зениту [62]. В среднем же, в силу формы Земли, характера её вращения и подстилающей поверхности 1 м<sup>2</sup> поверхности Земли получает в среднем около 200 Вт/ м<sup>2</sup>, что эквивалентно 4,8 кВтч/м<sup>2</sup>\*сутки или 1750 кВтч/м<sup>2</sup>\*год.

При этом наблюдаются резкие различия по широте, с одной стороны (табл. 4), и по сезону – с другой, причём с увеличением широты идёт резкое нарастание сезонных различий в поступлении солнечной радиации (рис.1).

Таблица 4. Среднесуточное и среднегодовое поступление солнечной радиации на горизонтальную поверхность земли по широтам, кВтч [16]

<i>Широта</i>	$0^0$	$10^0$	$20^0$	$30^0$	$40^0$
Сумма за год	2 190	2 145	2 009	1 803	1 532
Среднее за сутки, кВтч	6,00	5,88	5,50	4,94	4,20
<i>Широта</i>	$50^0$	$60^0$	$70^0$	$80^0$	$90^0$
Сумма за год	1 233	938	698	532	455
Среднее за сутки, кВтч	3,38	2,57	1,91	1,46	1,25

На  $0^0$  широты (экватор) различия между поступлением солнечной радиации в месяц с максимальным значением (март) и минимальным (июль) – всего в 1,2 раза (соответст-

венно, 6,44 и 5,43 кВтч/сутки). Однако, к широте  $40^{\circ}$  оно вырастает до 5,2 раз (соответственно, 6,86 в июле и 1,32 кВтч/сутки в январе), к широте  $50^{\circ}$  – в 13 раз (6,50 и 0,50 кВтч/сутки). Различия в поступлении солнечной радиации в летние месяцы невелики даже между экватором и полюсами, но кардинальны в холодное и тёмное время года. Это имеет ключевое значение для практического использования солнечной энергии, которое будет заведомо неэффективным в осенне-зимнее время выше 30-х - 40-х широт.

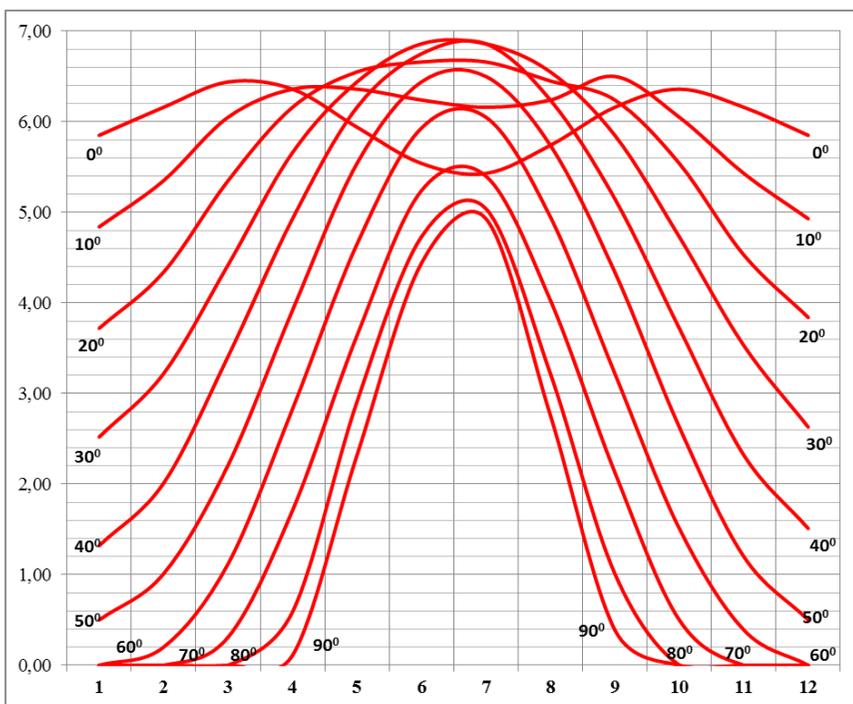


Рис. 1. График поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность земли, кВтч/сутки, по широтам и месяцам [16]

В свою очередь, валовый потенциал ветровой энергии может быть оценен при определённых допущениях о возмож-

ности её использования, т.е. в расчёт валового потенциала ветровой энергии неявно входят географические и технические составляющие. В частности, для его оценки необходимы определённые допущения о высоте размещения лопастей ветроэнергетической установки и расстоянии между установками.

Информационной базой для расчёта ветропотенциала являются данные метеорологических наблюдений и их интерполяция. Валовый потенциал ветровой энергии рассчитывается как «суммарная энергия воздушных масс, использование которой возможно современными ветроэлектрическими установками (ВЭУ) с максимально большой высотой захватываемого приземного слоя  $H$  и соответственной высотой оголовка ветротурбины  $h$ » [4]. В методике П.П. Безруких принимаются следующие допущения:

- Мощности ВЭУ – 1000...2000 кВт;
- $h$  – 75 метров;
- $H$  – 150 метров (примерно в 2 раза больше  $h$ );
- При обтекании воздушными потоками препятствия («воздушной плотины») высотой  $H$  возмущённый поток полностью восстанавливается на расстоянии  $20H$  после препятствия (в данном случае – 3000 м).

Исходные данные для расчёта валового гидроэнергетического потенциала – расход воды через поперечное сечение водотока в единицу времени ( $m^3/c$ ) и падение водотока (м) на данном участке.

Валовый гидроэнергетический потенциал данного участка водотока ( $N_i$ ) может быть рассчитан по формуле [5]:

$$N_i = g * ((Q_{n_i} + Q_{k_i}) / 2) * H_i$$

где:

- $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;
- $Q_{n_i}$  – расход воды в начале участка,  $m^3/c$ ;
- $Q_{k_i}$  – расход воды в конце участка,  $m^3/c$ ;
- $H_i$  – падение реки на данном участке, м.

Формула является частным случаем общего вида расчёта потенциальной энергии:

$$E = m \cdot g \cdot h.$$

Для расчёта общего валового гидроэнергетического потенциала территории потенциалы отдельных участков водотоков складываются.

Валовый потенциал биоэнергии, связанный с отходами сельского хозяйства, не является, в полном смысле, природным, а обусловлен хозяйственной деятельностью. Основные исходные показатели для расчётов отходов животноводства – поголовье крупного рогатого скота (КРС), свиней, мелкого рогатого скота (МРС), птицы, и масса образуемых ими физиологических отходов; для растениеводства – урожайность и также сопряжённая с нею масса отходов [1].

### ***Оценки величины валового потенциала ВЭР в мире***

Теоретический (валовый, природный) потенциал энергии на возобновляемых источниках в мире и в России, оцениваемый по данным и сходным методикам, оценивается в огромные величины, на несколько порядков превосходящие потребности человечества в энергии (табл.5-6), хотя точный и достаточно корректный его расчёт затруднителен.

В частности, потенциал солнечной энергии почти в 6000 раз больше годового мирового потребления энергии, т.е. за 1,5 часа Земля получает примерно столько же энергии от Солнца, сколько всё человечество потребляет за год.

Из таблиц видно, что основной объём, за исключением трудноопределимого и трудно извлекаемого геотермального потенциала, приходится на потенциал солнечной энергии, превышающий почти в 6000 раз (885 млн. против 153 тыс. ТВтч/год) мировое потребление энергии; в том числе, валовый солнечный потенциал, приходящийся на территорию

России, более, чем в 2000 раз (18 млн. против 8 тыс.) превышает потребление энергии в нашей стране.

Таблица 5. Теоретический потенциал ВИЭ в мире и текущее потребление первичной энергии человечеством, ТВтч ( $10^{12}$  Втч)/год

Вид энергии	Теоретический потенциал, ТВтч ( $10^{12}$ Втч)/год
Солнечная	885 млн.[62]
Ветровая	170 тыс. [39]
Геотермальная	278 млрд. (или $5,4 \times 10^{21}$ МДж - суммарный объём тепла, содержащийся в земной коре) [49]
Гидроэнергия рек	39 тыс.[60]
Океаническая энергия (приливная, волновая, осмотическая)	20-80 тыс.[51]
Биоэнергия	> 800 тыс. (исходя из ежегодного производства биомассой около $10^{11}$ тонн углерода ежегодно [48])
Мировое потребление энергии	153 тыс. (общее потребление первичной энергии в мире - 13,4 млрд. тонн нефтяного эквивалента в 2012 году) [50]

Суммирование теоретических потенциалов по всем источникам энергии было бы некорректным, поскольку изъятие солнечной энергии приводит к уменьшению всех остальных потоков. Поэтому общий теоретический потенциал ВИЭ (кроме геотермальных) можно условно приравнять к потенциалу солнечной энергии.

Таблица 6. Теоретический потенциал ВИЭ в России [4] и текущее потребление первичной энергии в России, ТВтч ( $10^{12}$  Втч)/год

Вид энергии	Теоретический потенциал, ТВтч ( $10^{12}$ Втч)/год
Солнечная	18 млн. (2,2 трлн. т.у.т.)
Ветровая	7,2 млн. (886 млрд. т.у.т.)
Малая гидроэнергетика	3,3 тыс. (402 млн. т.у.т.)
Лесная биомасса	3 тыс. (374 млн. т.у.т.)
Геотермальная	10,3 трлн. (1263 трлн. т.у.т.)
Потребление энергии в России (2016)	8 тыс. (1,1 млрд. т.у.т.) [44]

Кроме того, потенциал солнечной энергии в наибольшей степени поддаётся подсчёту, через измерение количества солнечной энергии, поступающей на единицу площади поверхности Земли.

### ***Оценки технического и других потенциалов ВЭР***

Другие виды потенциалов - географический, технический, экономический, имеют непосредственное отношение уже к оценке возможностей практического использования энергии на основе ВИЭ. Они существенно ниже валового и, в отличие от него, являются в высокой степени изменчивой величиной, зависящей от комплекса меняющихся факторов, таких, как:

- Характер земельных угодий и структура землепользования;
- Ограничения экологического характера;
- Уровень технологического развития;
- Уровень экономического развития и текущая экономическая конъюнктура;

- Законодательство и нормативная база, политика государства в сфере энергетики.

Как правило, данные виды потенциалов ещё труднее поддаются подсчёту, чем теоретические, и в большей степени зависят от принятых исходных допущений, спектр которых будет заведомо шире и сложнее, чем в случае с расчётом теоретического потенциала.

Одна из методик расчётов технических потенциалов также приводятся в работе П.П. Безруких [4]. Технический потенциал солнечной энергии рассчитывался, исходя из следующих допущений:

- Солнечные тепловые установки потенциально могут занимать не более 0,8% площади в каждом субъекте Российской Федерации; солнечные фотоэлектрические установки – не более 1%;

- КПД солнечных тепловых установок – 0,7, фотоэлектрических – 0,15.

Используются данные по производительности тепловых установок солнечного горячего водоснабжения из [19].

Исходя из этого, технический потенциал солнечной энергии составляет  $0,01 \cdot 0,15 = 0,0015$  от валового потенциала, или примерно в 700 раз ниже. Применительно к Российской Федерации эта величина составляет 25 700 ТВтч в год, что в 25 раз выше всего производства и потребления электроэнергии в России в настоящее время.

Технический потенциал ветровой энергии рассчитывался по более сложной схеме на основе следующих допущений:

- Использование энергии целесообразно в районах со среднегодовыми скоростями ветра не ниже 5 м/с, или с КИУМ ветроустановки мощностью более 100 кВт, составляющим 18%-20%.

- Для ветроустановок может быть использовано не более 10% территории;

- Используются ветроустановки большой мощности – от 100 до 2000 кВт.

В России требуемыми ветровыми характеристиками обладает около 20% территории. Таким образом, общая площадь, где ветроустановки могут быть размещены, составляет  $10\% \cdot 20\% = 2\%$  всей территории страны.

Расчёты, включающие данные параметры, среднюю мощность ветроустановок и правила их размещения (см. выше) дают величину, в 100 раз меньшую валового потенциала, или около 7000 ТВтч, что примерно в 7 раз выше всего производства электроэнергии в России.

Гидроэнергетический технический потенциал также определяется как технически осваиваемая часть валового потенциала.

П.П. Безруких приводит данные расчётов технических потенциалов малых рек России (табл. 7).

Таблица 7. Технические гидроэнергетические ресурсы малых рек России

По С.В. Григорьеву [6]		По А.Н. Вознесенскому [5]		По Л.П. Михайлову [17]	
млн. кВт	млрд. кВтч	млн. кВт	млрд. кВтч	млн. кВт	млрд. кВтч
51,7	452,9	44,5	389,9	40,77	357,1

В соответствии с этими оценками, технический потенциал малых рек России равен 35%-45% всей электроэнергии, производимой в России.

В случае с биоэнергией отходов сельского хозяйства технический потенциал принимается равным валовому, исходя из того, что все данные отходы технически перерабатываемы в энергию.

Экономический потенциал ВИЭ определяется как экономически целесообразный объём производства энергии на основе ВИЭ на данной территории при данных технологиях. Экономический потенциал рассматривается как производная от технического потенциала.

Один из базовых подходов – сравнение расчётной или фактической стоимости энергии, полученной при использовании возобновляемых и конвенциональных источников.

Экономический потенциал также может быть отождествлён и с рыночным потенциалом, и с потенциалом внедрения, и может рассматриваться как «реальный», «истинный» потенциал использования ВИЭ на данной территории при данном комплексе природных, технологических, финансово-экономических, социальных и других условий.

Географический потенциал представляется наиболее интересным и, на данный момент, неопределённым предметом исследования.

В основу расчёта географического потенциала кладётся территориальный принцип - это валовый потенциал за исключением потенциала территорий, по тем или иным причинам непригодным для установки мощностей на основе ВИЭ. Географический потенциал, чаще всего, рассматривается как производная от валового потенциала, находящаяся «между» валовым и техническим потенциалом, в свою очередь, определяемым через географический потенциал.

Также географический подход наблюдается на примере *расчётного гидроэнергетического потенциала, доступного к освоению* [3], рассчитываемого как валовый за вычетом следующих территорий:

1. Особо охраняемые природные территории (ООПТ);
2. Существующие водохранилища;
3. Территории, выявленные как неблагоприятные для строительства ГЭС с точки зрения инженерно-геологических условий.

В данном случае «расчётный потенциал, доступный к освоению», по сути, совпадает с господствующими определениями географического потенциала.

Кроме того, географическая (точнее, территориальная) составляющая присутствует при расчётах технического потенциала.

В то же время, понятие пригодности территории или пригодной территории для размещения энергетических объектов и инфраструктуры на основе ВИЭ, может быть очень широким и включать техническую, экономическую, социальную составляющие.

Доступность территории определяется, в значительной степени, уровнем технологического и экономического развития. Один из примеров – ветроэлектростанции в море (офшорные), появившиеся сравнительно недавно, на территориях (точнее, акваториях), которые ранее могли рассматриваться как непригодные.

Таким образом, географический потенциал можно рассматривать, в том числе, как производную от технического потенциала.

Кроме того, экономико-географические исследования включают анализ расселения, хозяйственной инфраструктуры и деятельности, также определяющие степень доступности территории.

В итоге, возможна ситуация, при которой географический потенциал окажется ниже технического или даже экономического.

Расчёты потенциалов (валового, технического, экономического, географического) дают укрупнённые оценки, позволяющие предварительно оценить перспективность территории для более детальных исследований возможностей развития энергетики на основе ВИЭ.

Также опыт показывает, что расчёты потенциалов возобновляемых источников энергии требуют корректировки с помощью мониторинга действующих опытно-экспериментальных или эксплуатационных установок.

Из оценок теоретического потенциала следуют, безусловно, многообещающие перспективы энергетики на ВИЭ. Теоретически, использование только солнечного потенциала всего на 0,1% позволило бы шестикратно перекрыть всё текущее

---

потребление энергии человечеством; в случае с Россией – двукратно.

Тем не менее, этого не только не происходит, но на все ВЭР, вместе взятые, на данный момент приходится порядка 10% всего мирового энергобаланса (см. Главу I), и перспективы кардинального роста этой величины в обозримом будущем остаются неопределёнными.

Очевидно, главным препятствием остаётся сравнительно высокая стоимость генерации энергии за счёт ВИЭ [8; 10].

В свою очередь, это определяется двумя основными причинами:

1. Характером самих ВИЭ, являющихся сравнительно низко концентрированными и нестабильными источниками энергии;
2. Недостаточным пока уровнем развития технологий использования ВЭР.

В то же время, мы наблюдаем прогресс в исследованиях и технологиях использования ВЭР, что позволяет рассчитывать на существенное увеличение их доли в мировом потреблении энергии в долгосрочной перспективе.

## **Глава III. История исследования ВЭР**

### ***Открытия и изобретения в энергетике, создание технологий использования энергии***

Приведённые выше расчёты потенциалов ВИЭ являются прикладной инженерно-технической, а также экономической, задачей. Основой же для исследования потенциала ВИЭ является, прежде всего, комплекс естественнонаучных – физических, химических, биологических, географических, геологических исследований, направленных на изучение свойств сред, продуцирующих ВЭР. База знаний, необходимая для использования ВЭР на современном этапе, закладывалась в течение нескольких столетий или даже тысячелетий в рамках наук о Земле.

Можно выделить несколько частично совпадающих по времени периодов и направлений исследований и разработок, относящихся к изучению ВЭР:

1. До XIX – начала XX века - открыты и сформулированы основные законы природы, раскрывающие свойства сред, продуцирующих ВЭР;
2. С XVIII-XIX вв. - формируется сеть регулярных наблюдений (в частности, гидрологических, метеорологических, океанографических, актинометрических и т.д.), на базе которых можно оценивать ВЭР;
3. С середины XVIII – конца XVIII века – начата разработка технических средств, позволяющих использовать ВЭР (в частности, первых гидротурбин, позже – ветротурбин, солнечных аккумуляторов и батарей и др.);

4. С начала XX века – реализуются первые крупные проекты использования ВЭР, разрабатываются понятия потенциала ВИЭ, методики его оценки, экономический анализ использования ВЭР;

5. Со второй половины XX века – масштабное распространение возобновляемой энергетики, ряд государств, в том числе – ведущих, к концу XIX – началу XX в. принимают планы и программы развития энергетики на основе ВИЭ, предполагающие частичное, местами – полное, замещение ВЭР ископаемых углеводородных источников энергии. В начале XXI века в некоторых странах такие программы уже реализованы.

Прежде всего, определяющим было исследование **энергии**, видов энергии, трансформации энергии, становление энергетики как науки и инженерно-технической практики, в том числе – электроэнергетики.

Само слово «энергия», которое можно перевести и как действие, и как сила или мощь, впервые зафиксировано в трактатах Аристотеля в значении деятельности.

Современное определение энергии – **«общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи»** [45]. Также энергия определяется как мера способности системы производить работу.

Основные формы энергии, выделяемые в настоящее время: механическая, тепловая, химическая, биологическая, электрическая, электромагнитная, ядерная. Одни формы энергии способны переходить в другие.

Применительно к ВЭР, в зависимости от источника, существуют и используются, главным образом:

- Электромагнитная и тепловая солнечная энергия;
- Механическая энергия ветра (движения воздуха), в свою очередь, являющаяся следствием трансформации солнечной энергии, нагревающей водную и земную поверхность;

- Механическая энергия текущей воды, перемещающейся под действием сил гравитации;
- Механическая энергия океанических приливов и отливов (также под действием гравитационного взаимодействия Земли, Солнца и Луны);
- Механическая волновая энергия на поверхности водоёмов (возникающая под действием ветровой энергии);
- Тепловая энергия недр Земли (жидкостей, газов и горных пород);
- Тепловая энергия, содержащаяся в органическом материале (биомассе).

Использование ВЭР заключается, главным образом, в переводе, посредством определённых технических средств, энергии в данных формах, содержащейся в природе или отходах хозяйственной деятельности, в тепловую, электрическую и механическую энергию, далее непосредственно используемую в быту и на производстве.

Исследование энергии в Новое время сопряжено, в частности, со следующими именами и открытиями в механике, электроэнергетике, теплоэнергетике, вопросах преобразования энергии:

- Уильям Гилберт (1544-1603), считающийся первооткрывателем электричества как явления, первым введший термин «электрический»;
- Галилео Галилей (1564-1642), исследовавший проявления механической энергии, такие, как инерция (закон инерции) и свободное падение тел;
- Роберт Бойль (1627-1691), исследовавший преобразования тепловой и механической энергии в газах, автор закона Бойля, позже вновь открытого Эдмом Мариоттом и известное ныне как закон Бойля-Мариотта;

- Христиан Гюйгенс (1629-1695), один из первых исследователей природы света и механизма распространения волн, в том числе, световых;
- Исаак Ньютон (1642-1727), заложивший основы исследования механической энергии, автор всем известных законов Ньютона, описывающих механическое взаимодействие тел и ставших основой классической механики;
- Готфрид Лейбниц (1646-1716), введший понятие «живой силы» в механике (термин «энергия» в современном понимании ввёл в 1807 году Томас Юнг) и сформулировавший закон сохранения энергии для механических систем; для немеханических явлений законы сохранения энергии позже формулировались Д. Бернулли, Л. Эйлером, Ю. Р. Майером, Дж. П. Джоулем и Г. Л. Гельмгольцем (в термодинамике данный закон известен как Первое начало термодинамики);
- Шарль Дюфе (1698-1739), систематизировавший электрические явления и открывший два рода электрических зарядов (ныне называемых положительным и отрицательным);
- М.В. Ломоносов (1711-1765), разработавший, в частности, молекулярно-кинетическую теорию тепла (корпускулярно-кинетическая теория М.В. Ломоносова);
- Шарль Кулон (1736-1806), сформулировавший закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов (закон Кулона); кулон – единица измерения электрического заряда, названа в его честь;
- Джеймс Ватт (1736-1819), изучавший явления тепловой энергии, создатель парового двигателя и универсальной паровой машины; ватт – международная единица мощности, названная в его честь;
- Алессандро Вольты (1745 – 1827), открыватель электрической цепи; создатель первого в мире химического источника тока и гальванического элемента, ставшего прообразом современных батарей;

- Томас Юнг (1773-1829), один из создателей волновой теории света; автор понятий механической энергии и модуля упругости;
- Карл Гаусс (1777-1855), заложивший основы математической теории электромагнетизма и первым введшим понятие потенциала электрического поля;
- Майкл Фарадей (1791-1867), исследователь электромагнетизма и создатель электродвигателя;
- Николя Карно (1796-1832) – один из основателей термодинамики, описавший термодинамический цикл (цикл Карно), связывающий тепловую и механическую энергию системы, и сформулировавший теорему (теорему Карно) о коэффициенте полезного действия (КПД) тепловых двигателей;
- Бенуа Клапейрон (1799-1864), выведший уравнение состояния идеального газа, объединяющее закон Бойля — Мариотта, закон Гей-Люссака и закон Авогадро, обобщённое в 1874 году Д. И. Менделеевым (уравнение Менделеева — Клапейрона); выведший уравнение, устанавливающее связь между температурой плавления и кипения вещества и давлением (уравнение Клапейрона — Клаузиуса).
- Эмилий Ленц (1804-1865), сформулировавший закон индукции (правило Ленца) и соотношение, связывающее теплоту, силу тока и электрическое сопротивление (закон Джоуля-Ленца);
- Юлиус фон Майер (1814-1878), автор уравнения Майера, связывающего теплоёмкость, объём и давление газа;
- Джеймс Джоуль (1818-1889), исследовавший взаимосвязь механической, тепловой, электрической и магнитной энергии, сформулировавший (одновременно с Ю. фон Майером) закон всеобщего сохранения энергии; принятая ныне международная единица измерения энергии – джоуль ( $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ ), названа его именем;
- Герман Гельмгольц (1821-1894), исследователь процессов брожения и теплообразования в живых организмах;

сформулировал закон сохранения энергии в химических процессах, ввёл понятие свободной энергии, показал универсальность законов сохранения;

- Рудольф Клаузиус (1822-1888), один из разработчиков основ термодинамики; ввёл понятие энтропии;
- Уильям Томсон, барон Кельвин (1824-1907), исследователь в области термодинамики и термоэлектричества, молекулярной динамики, волновой теории света, автор одной из первых формулировок второго закона термодинамики, один из создателей теории реальных газов;
- Д.И. Менделеев (1834-1907), заложивший основы для исследований химической энергии, исследователь тепловых явлений, взаимосвязей химической и электрической энергии, создатель уравнений для реальных газов;
- Томас Эдисон (1847-1931), один из основателей электроэнергетики, разработчик электродвигателей и электрического освещения;
- Никола Тесла (1856-1943), один из создателей устройств, в создание устройств, работающих на переменном токе, многофазных систем, синхронного генератора и асинхронного электродвигателя; исследователь электромагнитных явлений; тесла – единица измерения магнитного потока, названа в его честь;
- Макс Планк (1858-1947), основатель квантовой физики; постоянна Планка связывает энергию и частоту электромагнитного излучения;
- Вальтер Нернст (1864-1941), сформулировавший третий закон термодинамики;
- Роберт Милликен (1868-1953), измеривший заряд электрона и разрабатывавший теорию фотоэффекта;
- Альберт Эйнштейн (1879-1955), создатель теории относительности и закона взаимосвязи массы энергии в рамках теории.

На основе фундаментальных исследований энергии в XVIII – XX вв. было создано основное оборудование и технологии, позволяющие использовать энергетические ресурсы природы, в том числе ВЭР.

Прежде всего, появились паровые машины; первые идеи и разработки паровых машин относятся ещё к концу XVII века. Также ещё к XVIII веку относится появление первых турбин – гидротурбин и паровых турбин.

В XIX веке идёт массовое создание и совершенствование технологий трансформации и использования энергии, включая: появление двигателей внутреннего сгорания и автомобилей, появление газовых двигателей, появление электрических двигателей, средств транспорта и связи на основе использования электроэнергии (электромобили, электрические лодки, электрические кабели и электромагнитный телеграф).

Собственно в возобновляемой энергетике к XIX веку относится появление первых гидроэлектростанций (ГЭС), геотермальных станций, ветродвигателей.

XX век стал эпохой, прежде всего, усовершенствования того, что было открыто и изобретено ранее; кроме того, к прошлому столетию относится освоение ядерной энергии, где Россия (СССР) также стала мировым лидером наряду с США. В области ВИЭ уже к XX веку относится появление первых солнечных станций, сначала тепловых, позже – фотовольтаических, преобразующих солнечную энергию в электроэнергию. Кроме того, в XX веке началось исследование полупроводников, что впоследствии также стало основой для разработки фотовольтаических генерирующих систем.

---

## *Исследования и развитие технологий в гидроэнергетике, ветроэнергетике, солнечной энергетике*

Далее рассмотрим историю научных исследований и технических разработок на примерах гидроэнергетики, ветроэнергетики и солнечной фотовольтаической энергетики.

Для развития ветроэнергетики и гидроэнергетике ключевыми являются исследования в гидро- и аэродинамике.

Гидродинамика относится к числу древнейших наук – первые трактаты о механике жидкости появились в Древней Греции ещё до нашей эры; исследования в этой области связаны с именами Архимеда, Ктезибия, Герона Александрийского [20]; тогда же появились первые гидротехнические сооружения и системы водоснабжения.

Одно из известных технических изобретений того периода – архимедов винт, использовавшийся для подачи воды на более высокие уровни и приводившийся в движение, обычно, ветряным колесом.

Гидродинамика, так же, как и аэродинамика, в современном виде зарождается в периоды позднего Средневековья, Возрождения и Просвещения. Основные вехи связаны со следующими именами и открытиями:

- Леонардо да Винчи (1452-1519), изучавший аэродинамику летательных аппаратов, образование водоворотов, истечение жидкости;
- Галилео Галилей (1564-1642), показавший рост гидравлических сопротивлений с увеличением скорости и возрастанием плотности среды;
- Эванджелиста Торричелли (1608-1647), давший формулу расчёта скорости жидкости, также исследовавший давление атмосферы и создавший первый барометр;
- Даниил Бернулли (1700-1782), автор труда «Гидродинамика», где вывел уравнение стационарного течения несжи-

маемой жидкости (известное ныне как закон Бернулли), и создатель кинетической теории газов;

- Леонард Эйлер (1707-1783), составивший дифференциальные уравнения движения жидкости;

- Анри Пито (1695-1771), создатель прибора (прибор Пито) для измерения напора текущей жидкости или газа;

- Рейнгард Вольтман (1767-1837), создатель «вертушки Вольтмана» - прибора, измеряющего скорость течения воды [34];

- Джон Стокс (1819-1903), создавший систему дифференциальных уравнений движений вязкой жидкости (газа) – уравнения Навье-Стокса;

- Осборн Рейнольдс (1842-1912), установивший критерий перехода ламинарного режима течения жидкости в турбулентный (число Рейнольдса).

Исследования свойств и поведения жидкостей и газов позволили разработать ряд устройств, позволяющих использовать энергию текущей воды и воздуха.

В частности, были созданы гидротурбины, позже – ветрогенераторы, хотя в качестве их прообразов можно рассматривать водяные колёса и ветряные мельницы. Создание современных гидротурбин можно отсчитывать с 1750 года, когда Иоганн Сегнер предложил модель водяного двигателя (Сегнерово колесо), где, помимо напора воды, использовалась сила реакции, создаваемая её потоком. Сосуд, в который сверху поступала вода, был соединен с осью. Внизу находились крестообразные трубки, с концами, загнутыми в одну сторону. Поступавшая в сосуд вода вытекала через них, создавая силу реакции, действующую во всех трубках в одну сторону и приводившую колесо во вращение. Далее колесо Сегнера в течение второй половины XVIII – первой половины XIX вв. было усовершенствовано Леонардом Эйлером, Жаном Понселе, Бенуа Фурнероном, Джеймосом Френсисом. В итоге появились различные типы гидротурбин (струйные и реактивные), КПД которых достигал 80%-85%. Широкое распространение гид-

ротурбины получают во второй половине XIX века с началом строительства гидроэлектростанций (ГЭС); основные принципы работы гидротурбин сохраняются и в наше время.

Первый (или один из первых) ветрогенераторов для производства электроэнергии связан с именем Чарльза Браша [46], построившего его в 1888 году. Эта конструкция также прошла ряд усовершенствований. Следует отметить, что развитие ветроэнергетики было тесно связано с аэродинамическими разработками для воздухоплавания и авиации, а здесь огромный вклад принадлежит выдающемуся русскому учёному Николаю Жуковскому. Николай Егорович, в частности, разработал вихревую теорию воздушного винта и установил закон распределения скорости у лопасти винта, ставший теоретической основой для проектирования воздушных винтов. Это имело непосредственное отношение и к проектированию лопастей ветрогенераторов и создало основу для проектирования ВЭС во всём мире.

Планы развития энергетики на основе возобновляемых источников нашли отражение даже в научно-популярной литературе 1930-х. В частности, в 1933 году в одном из первых номеров журнала «Техника - молодёжи» была опубликована статья [13], где рассматривались идеи и перспективы использования основных ВИЭ, включая ветроэнергетику, речную гидроэнергетику, использование энергии приливов, солнечную энергетику. Приводится информация о советских и зарубежных исследованиях и проектах того времени с примерными оценками ресурсов ВЭР:

*«По подсчетам ряда ученых для полной механизации труда необходима мощность в 2 квт на каждого жителя земного шара. Пока же современное человечество располагает только 0,04 квт на «душу» населения, распределяемого следующим образом: энергия, получаемая от сжигания угля, нефти, торфа, дров и других горючих веществ, составляет 0,023 квт; энергия движущихся вод—0,016 квт; энергия ветра— 0,001 квт.*

*Эти цифры убеждают нас в том, что количество вырабатываемой энергии получается главным образом за счет расходования природных запасов топлива, восстановление которых идет крайне медленно. Геологический конгресс 1913 г. подсчитал, что при существующих темпах выработки запасов угля в Англии хватит только на 200 лет, в Германии на 300—350 лет. Нефть в САСШ и Мексике почти на исходе и ее хватит только на 40—50 лет. Лес вырубается в САСШ ежегодно в количестве 22,4 млрд. кубофутов, в то время как прирост древесины составляет только 6 млрд. кубофутов. Таким образом, лесных массивов САСШ может хватить только на 50 лет...*

*В 1900 г. всё мировое потребление бензина составляло всего 600 т, а в 1929 г. оно достигло 4 млн. т. Рост потребления энергии увеличивается в значительно большей степени, чем это предполагали еще только несколько лет назад.*

*Как бы ни были ошибочны в ту или иную сторону все эти подсчеты, несомненно все же одно, что современная техника должна искать новые источники энергии....*

*... Энергетика будущего требует не ветряка для размола муки или подъема воды в цистерну для нужд небольшого отдельного хозяйства, она **требует создания громадных по мощности и устойчивых по режиму работы ветряных установок.** Эти установки должны передать своё движение электрогенераторам, которые дадут ток в линии электропередачи и этим током обслуживают потребности не только ближайших местностей, но и целых обширных районов....*

*...Стоимость ветроэнергии в настоящее время составляет среднюю между стоимостью паровой энергии и водной энергии — примерно 1—2 коп. за киловатт. При введении в эксплуатацию мощных ветростанций стоимость энергии должна значительно понизиться.*

*Ветроэлектростанции должны работать «кустами», обслуживая общую кольцевую электрическую сеть высокого напряжения. При этом условии отпадает вопрос о неравно-*

мерности силы ветра и необходимости устраивать сложные и дорогие аккумуляторы энергии....

... Получение энергии за счет движения воды возможно и другим путем. К далекой древности восходят попытки использования движения громадных масс воды, совершающихся во время морских приливов и отливов. В устье р. Темзы (Англия) до сих пор сохранились древние водяные мельницы, построенные кельтами еще за много веков до наших дней и работающие на приливных волнах.

Принципиально задача использования приливов не представляет больших технических затруднений. С астрономической точностью приливы совершаются два раза в сутки. При этом подъем уровня воды колеблется в разных местах побережья от 4 до 18 м. Во время прилива воду направляют в ограниченную плотинами бухту. При отливе же запасенную воду можно спустить, при этом энергия движущейся воды перерабатывается с помощью гидротурбин в электрический ток...

В настоящее время в Европе и Америке уже имеется более 10 приливных станций. Величайшая из них запроектирована в Англии на р. Северн, в Бристольском заливе. Мощность этой станции будет равна 500 тыс. л. с...

... Величина энергии солнечных лучей, падающих на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, определяется примерно в 1 квт. Можно считать, что общая площадь крыши большого города получает в среднем от 10 до 100 млн. квт солнечной энергии. При использовании только 1—2 проц. можно получить от 100 тыс. до 2 млн. квт-ч полезной энергии....

...система парников или тепловиков, устроенных впервые Франком Шуманом в Филадельфии. Действие тепловика основывается на замечательном свойстве стекла и некоторых других материалов пропускать только определенную группу тепловых лучей (инфракрасных) и задерживать все остальные тепловые лучи.

*Солнечные лучи проходят через стекло с малыми потерями. Но образующиеся в перекрытом пространстве вторичные тепловые лучи, излучаемые нагретыми предметами, стеклом уже не пропускаются. Вследствие этого под парниковой рамой происходит повышение температуры, т. е. накопление тепла.*

*Это повышение температуры может быть весьма значительным. Например пески Кара-Кумов нагреваются летом до 80°, оставаясь совершенно открытыми для обратного излучения тепла. В южных широтах легко получить под рамой парника температуру в 100—150°, достаточную для испарения воды. Полученный при этом пар может привести в действие электротурбину. По этому принципу у нас около г. Капбланка (Средняя Азия) проф. Вейнберг построил первую в мире большую опытную солнечную станцию...*

*... Кроме того становится очевидным, что мы совершенно неразумно растрачиваем громадные количества энергии, например на отопление жилищ. Проф. Вейнберг с помощью т. Коймана построил легкий домик, являющийся своего рода «аккумулятором тепла». В этом легком домике применена особая изоляция стен, правильно выбрано распределение и расположение окон, окраска стен и крыши, в результате получилась постройка, прохладная летом и теплая зимой без какого-либо отопления.*

*Большое значение может иметь непосредственное преобразование солнечной энергии в электрическую. Для этой цели можно применить следующий весьма простой способ. На*

*крышах домов устраиваются длинные узкие желоба; в местах спая эти желоба образуют термоэлектрическую пару, обладающую свойством давать электрический ток при повышении температуры. Под влиянием солнечных лучей эти гигантские батареи термоэлементов дают ток. Пробный проект такого использования солнечной энергии был разработан т. Потаниным. При этом выяснилось, что обычный*

*городской дом может снять со своей крыши всю необходимую для его бытовых нужд электроэнергию. Эксплуатация такого устройства даже при коэффициенте полезного действия только в 2 проц. может уже себя вполне оправдать».*

В духе своего времени автор возлагал надежды, прежде всего, на социалистическую экономику СССР с её грандиозными проектами развития и централизованным планированием в противовес неорганизованной рыночной стихии капиталистического мира. В то же время, отмечаются интересные идеи и достижения в использовании ВИЭ в западных странах. Энергетика на основе новых источников объявляется «энергетикой будущего». Хотя термин «возобновляемые энергоресурсы» или «возобновляемые источники энергии» в то время ещё не использовался.

Рождение солнечной фотовольтаической энергетики можно отсчитывать с 1839 года, когда Александр Беккерель обнаружил фотоэлектрический эффект [23]. В 1873 году Уиллоуби Смит обратил внимания на фотопроводящие свойства селена, а 14 лет спустя Генрих Герц заметил облегчённое прохождение искры через цинковые разрядники при направлении на них потока ультрафиолетового излучения.

Позднее фотоэффект детально изучал А. Г. Столетов, сформулировавший первый закон внешнего фотоэффекта. Первый фотоэлемент был создан в 1883 году Чарльзом Фриттсом на селене, покрытом тонким слоем золота. КПД такого фотоэлемента не превышал 1 %. Объяснить фотоэффект удалось Альберту Эйнштейну в 1905 году на основе гипотезы Макса Планка о квантовой природе света.

Именно внутренний фотоэффект - процесс разделения генерируемых квантами света электронно-дырочных пар на p-n-переходе, лежит в основе процесса генерации электрического тока в фотоэлементах в настоящее время.

Основным материалом при производстве солнечных элементов стал кремний. В чистом виде он был выделен в 1811

году Жозефом Гей-Люссаком и Луи Тенаром. Кремний в элементарном виде был получен в 1825 году Берцелиусом путём воздействия металлическим калием на фтористый кремний  $\text{SiF}_4$ . Способ получения чистого кремния из горных пород – кварцитов, был разработан Н.Н. Бекетовым.

В свою очередь, первое описание фотоэффекта в в р-п-переходе в кристалле кремния относится к 1941 году. У первых солнечных элементов (СЭ) плоскость р-п-перехода была перпендикулярна рабочей поверхности, а р-п-переходы изготавливались в процессе выращивания монокристаллов. В 1952 году был разработан полупромышленный образец СЭ с р-п-переходом на основе монокристалла германия, а в 1954 году Пирсон с сотрудниками компании Bell обнаружил, что кремниевые СЭ с р-п-переходом, параллельным рабочей поверхности, имеют в пять раз больший КПД - около 5 %.

В СССР первые работы по созданию фотоэлектрических преобразователей проводились в Физико-техническом институте Академии Наук в Ленинграде под руководством А. Ф. Иоффе. В 1938 году создан первый фотоэлемент на основе селенисто-галлиевых элементов с КПД не выше 1%.

Именно тогда Иоффе выступил с идеей «миллиона солнечных крыш» – выстилания солнечными батареями крыш зданий. В то время такая идея была воспринята как утопическая, но сейчас она реализуется в ряде стран.

С 1950-х в СССР (во ВНИИТ) велись разработки и выпуск солнечных батарей для работы в космосе. В 1958 году солнечные батареи на кремниевых фотоэлементах впервые были установлены на третьем советском спутнике, а также и на американском спутнике «Авангард». С тех пор солнечные элементы стали основным источником энергии на всех космических аппаратах на околоземной орбите.

Прогресс в технологиях, прежде всего, в увеличении КПД солнечных батарей, достигался за счёт совершенствования способа выращивания более чистых монокристаллов и применения диффузионных и ионных методов получения р-п-

перехода. КПД современных кремниевых батарей достигает уже 20%-25%.

Итак, мы видим, что от первых исследований электрических явлений до современных солнечных фотовольтаических батарей прошло около 400 лет, и были задействованы данные и результаты исследований в очень широком спектре областей.

### ***Система наблюдений за природной средой, географические исследования ВЭР***

Другое, не менее важное, направление исследований – географические, относящиеся к непосредственным наблюдениям движения энергии в природной среде, на основе которых можно рассчитывать объёмы и распределение ВЭР. Его можно разделить на три основных группы:

- Сеть регулярных гидрологических, метеорологических, океанографических и океанологических, геологических и геофизических наблюдений и исследований;
- Исследования общегеографического характера (включая и физико-географические, и экономико-географические), устанавливающие территориальные закономерности и различия на уровне природы и хозяйства;
- Картографирование территорий и акваторий, создание геоинформационной основы для оценки ВЭР.

Рассмотрим данное направление также на примере ветровых, гидрологических и солнечных ВЭР. В контексте исследований ВЭР наибольшее значение имеют измерения скоростей ветра, скоростей течения и расхода воды в реках, поступающей в земную атмосферу и на земную поверхность солнечной радиации, выполняемые сетью станций на регулярной основе.

Первые регулярные метеорологические и гидрографические наблюдения в мире, в том числе, в России, начинаются в XVII-XVIII вв. Это, равно, как и становление климатологии и метеорологии в качестве науки, стало возможно, в свою оче-

редь, после ряда изобретений, в частности термометра Галилеем, барометра Торричелли, а также гигрометра, дождемера, флюгера, анемометра.

С конца XVIII века формируется сеть метеостанций. В России 13 апреля 2019 года исполняется 185 лет со дня создания Гидрометеорологической службы (прообраза современного Гидрометцентра). В 1834 году была создана Нормальная обсерватория при Горном институте, а Николаем I подписан Указ «О учреждении магнитных и метеорологических наблюдений» под эгидой обсерватории и выделены необходимые средства [40]. С этого момента сеть наблюдений растёт.

В 1849 году была учреждена Главная физическая обсерватория – основной методический и научный центр Гидрометслужбы России на протяжении многих лет (сегодня – Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова).

В январе 1872 года вышел первый «Ежедневный метеорологический бюллетень» с полученными по телеграфу сообщениями 26 русских и двух зарубежных станций слежения.

Современная метеорологическая служба России считает датой своего основания 21 июня 1921 года, когда В.И. Ленин подписал декрет Совета Народных Комиссаров «Об организации единой метеорологической службы в РСФСР». [41].

Мировая сеть метеорологических станций, проводящих наземные наблюдения на основной части поверхности материков, сложилась в середине XIX века. Наблюдения за состоянием атмосферы на различных высотах были начаты в горах, а вскоре после изобретения аэростата (конец XVIII в.) – в свободной атмосфере. С конца XIX века для наблюдения за метеорологическими элементами на различных высотах широко используются шары-пилоты и шары-зонды с самопишущими приборами. В 1930 советский учёный П. А. Молчанов изобрёл радиозонд – прибор, передающий сведения о состоянии свободной атмосферы по радио. В дальнейшем наблюде-

ния при помощи радиозондов стали основным методом исследования атмосферы на сети аэрологических станций [42].

К этому же периоду, XVII-XVIII вв., относится начало первых гидрологических исследований и наблюдений, примерно с конца XVIII века – также на регулярной основе.

В России организационное оформление Гидрографической службы было осуществлено в 1718 учреждением Адмиралтейств-коллегии, которой было поручено ведать и этой стороной морского дела. В 1827 учреждено Управление Генерал - Гидрографа, преобразованное в 1885 в Главное гидрографическое управление [36].

Систематические исследования океана – важнейшего резервуара ВЭР, также разворачиваются в XVIII – XIX веках, хотя первые, самые общие, представления о размерах и конфигурации Мирового океана, основных течениях, приливах и отливах были получены ещё в эпоху Великих Географических открытий в предшествовавшие столетия.

В 1664 А. Кирхер составил первую карту морских течений. В 1725 Л. Марсильи выполнил ряд измерений температуры воды на различных глубинах в Средиземном море. В 1749 капитан Эллис впервые измерил температуру на больших глубинах (до 1630 м) у северо-западных берегов Африки. В 1770 Б. Франклин составил первую карту Гольфстрима, обосновал главную причину образования морских течений.

Огромное значение имело создание Ньютоном теорий приливов и волн в океане, развитой далее в XVIII-XIX вв. Бернулли, Лапласом, Лагранжем, Герстнером, Эри, Фрудом, в XX веке – Дж. Дарвином, Штернеком, Дефантом, Праудменом, Дудсоном, Кочиным, Сретенским, Шулейкиным.

В начале XIX века большую роль сыграли изобретение Ленцем и Парротом батометра и глубомера, а также их опыты, показывающие влияние давления на температуру воды.

Также большое значение для океанографических исследований имела первая русская кругосветная экспедиция И. Ф. Крузенштерна и Ю. Ф. Лисянского, во время которой прово-

дились измерения температуры воды на больших глубинах, наблюдения за течениями и свойствами воды, и ряд других кругосветных экспедиций, совершённых отечественными и зарубежными исследователями в течение XIX века, в частности, на судне «Челленджер» в 1870-х.

В тот же период организуются первые береговые пункты наблюдений, а Ф.П. Литке изобретает приливомер, который устанавливают на берегах Северного Ледовитого и Тихого океанов. В середине XIX Ф. Мори составил несколько карт течений, а Э. Ленц предложил первую схему вертикальной циркуляции вод океана.

В конце XIX - начале XX вв. организуются международные и национальные океанографические учреждения и сети береговых станций. Созданный в 1902 Международный совет по изучению моря ввёл унификацию методик океанографических измерений, стандартные горизонты и разрезы для повторных наблюдений в океане. К середине XX века разработаны теоретические обобщения данных наблюдений по всем океанам и морям и выявлены закономерности формирования и изменчивости их термогалинной и динамической структуры. [43].

Огромную роль для оценки ВЭР сыграло развитие актинометрии – науки о солнечном излучении и его трансформациях в геосферах, и актинометрические наблюдения, в том числе, в рамках системы метеонаблюдений.

Первые измерения солнечного тепла (в некоторых относительных единицах) были произведены Э. Галлеем в 1693. В 1896 Р. Н. Савельев впервые провёл измерения прямой солнечной радиации с воздушного шара, положив этим начало актинометрическим исследованиям в свободной атмосфере. Достаточно строгие количественные исследования начались после создания пиргелиометра (1887) и пиргеометра (1905) К. Ангстремом и биметаллического актинометра (1905) В. А. Михельсоном.

В СССР в 1925 при Главной Геофизической обсерватории (ГГО) была создана постоянная актинометрическая комиссия, под руководством которой началось расширение сети актинометрических станций. Впервые в СССР в 1948 в ГГО начались радиационные измерения с самолёта. С середины 1950-х в СССР, США, Германии, Японии начались исследования свободной атмосферы при помощи актинометрических радиозондов (АРЗ). С 1963 впервые в мире в СССР начала работать сеть актинометрического радиозондирования, проводящая регулярные выпуски АРЗ. Кроме того, актинометрические исследования свободной атмосферы при помощи АРЗ проводят с кораблей погоды в Антарктиде [33].

Расширение горизонтов исследований ВЭР началось также с 1950-х с началом запуска искусственных спутников Земли; в настоящее время сеть регулярных спутниковых наблюдений покрывает практически всю поверхность Земли, поставляя информацию практически в режиме онлайн.

Теоретические научные географические основы исследований ВЭР закладывались также с XVII-XVIII вв. Постепенно выделилось несколько групп географических наук: гидрометеорологические (климатология и метеорология, гидрология, океанология), физико-географические направления (геоморфология, ландшафтоведение, почвоведение, биогеография), экономико-географические.

Фундаментальные географические закономерности относятся к распределению природных условий (а значит, и ВЭР) по поверхности Земли. Прежде всего, следует отметить законы широтной и высотной поясности (зональности) природных условий. Здесь наиболее известны имена Александра Гумбольдта, в начале XIX века обосновавшего представление о климатических и растительных зонах Земли, и В.В. Докучаева, сформулировавшего в конце XIX века широтную зональность в качестве мирового закона. В учение о климатических поясах огромный вклад внёс А.И. Воейков в конце XIX – начале XX века.

В России в организационном смысле ключевую роль в географических исследованиях сыграло Русское географическое общество, созданное в 1845 году. Далее, в XIX – XX вв., сеть географических исследовательских организаций и подразделений расширяется.

Экономико-географические и экономические исследования также играют весомую роль в оценке ВЭР. Прежде всего, информация экономико-географического характера даёт представления о потенциальных потребителях ВЭР на той или иной территории и возможностях продуцирования ВЭР (в частности, биоэнергии отходов) в ходе хозяйственной деятельности; иными словами – об экономическом, доступном, реализуемом потенциале ВЭР на данной территории, исходя из реальных условий жизни и хозяйствования.

Другая сторона связана, пусть косвенно, с исследованиями пространственно-временных закономерностей экономического развития, что позволяет увязывать технологии и масштабы использования ВЭР с определёнными экономическими циклами и до определённой степени прогнозировать эти процессы. В данном случае большую роль играют концепции экономики инноваций Й.Шумпетера, концепции Центра и Периферии мирохозяйственных систем (Дж. Фридман и др.), теории долгосрочных циклов экономического развития, в частности – циклов Кондратьева.

Следует отметить, что темы географической зональности ВЭР и экономико-географических аспектов их использования пока остаётся недостаточно разработанной.

Накопленная база знаний о природной и хозяйственной среде стала основой для расчётов потенциалов ВЭР, которые активно проводятся с середины XX века (подробнее в Главе I).

Большой вклад в исследование ВЭР вносит картография и развитие геоинформационных технологий; создан ряд геоинформационных систем (ГИС), содержащих информацию о наличии и использовании ВЭР, в частности [37].

## **Глава IV. География использования и перспективы изучения ВЭР**

### *География мирового производства электроэнергии на ВЭР.*

Мировые центры развития ветровой и солнечной энергетики за последние 20-25 лет смещались дважды. В 1990-е лидером были США, далее центр развития энергетики на ВИЭ сместился в Западную Европу. Наконец, в последние 5-10 лет лидером стал Китай, вышедший на первые места как по объёму установленных мощностей солнечной и ветроэнергетики, так и по объёму производства оборудования – в частности, в настоящее время на Китай приходится около 70% всего мирового производства солнечных батарей.

Закономерности использования возобновляемой энергетики во многом связаны с географическим положением и природными условиями. Это естественно, учитывая зависимость возобновляемых источников энергии (ВИЭ) от природных факторов, таких, как количество поступающей на Землю солнечной энергии, сила ветров, продуктивность биосферы, наличие гидрологических и геотермальных источников.

Общие объёмы и структура мирового производства электроэнергии на ВИЭ по регионам мира показывает сложную картину, местами прямо противоположную представлениям о лидерстве западных стран. Например, наиболее высока доля ВИЭ (включая гидроэнергетику) в энергобалансе в странах Центральной и Южной Америки (более 56%). При этом доля данного региона в мировом производстве электроэнергии на ВИЭ составляет 17,4% (U.S. Energy Information Administration – EIA, 2013), что существенно выше его доли в мировом производстве всей электроэнергии, составляющей 6,8%.

Доля ВИЭ в Европе (29,1%) существенно превосходит среднюю мировую (23%), в то же время в США, Японии и Австралии она вдвое ниже (12,4%, 12,7% и 10,1%, соответственно), чем в мире в среднем, и заметно ниже, чем в России (16,6%). Таким образом, приходится говорить не о лидерстве, а о среднем уровне развития возобновляемой энергетики в группе стран, считающихся экономически наиболее развитыми, в то время как лидерство принадлежит Центральной и Южной Америке и ряду стран Азии и Африки. При этом, на страны Азии вне Ближнего Востока приходится, прежде всего, наибольший абсолютный объём производства возобновляемой электроэнергии – 31,9% мирового. Примерно 2/3 этого объёма приходится на Китай.

Кроме того, доля ВИЭ в энергобалансе резко различается и внутри группы западноевропейских стран – от 21-24% в Германии и Испании и даже 50-100% в Норвегии, Исландии и Дании до 10-14% в Нидерландах и Бельгии.

### ***География мировой гидроэлектроэнергетики***

На гидроэлектроэнергию приходится 77% производства всей электроэнергии на основе ВИЭ. Можно выделить несколько регионов, где ГЭС наиболее велики благодаря сочетанию геоморфологических и климатических условий, обеспечивающих полноводность и большие уклоны рек, и где производится в настоящее время основная часть гидроэлектроэнергии мира.

Как правило, это предгорные районы:

– Центральная и Южная Америки, прилегающие к Андам, Гвианскому и Бразильскому плоскогорьям бассейны Амазонки, Ориноко, Параны, где вырабатывается более 700 млрд кВт·ч в год гидроэлектроэнергии или более 20% от общемировой.

– Центральная и Южная Африка, бассейны Нила, Конго, Замбези и Лимпопо, также берущих начало в горных рай-

онах, связанных с Восточно-Африканским рифтом (Эфиопское нагорье, ВосточноАфриканское плоскогорье, Рувензори) – около 100 млрд кВт·ч или 3% мировой выработки.

- Южная и Восточная Азии, связанные с горными системами Памира, Тибета и Гималаев и бассейнами рек Инда, Ганга, Брахмапутры, Иравади, Янцзы, Меконга – более 1000 млрд кВт·ч или 30% мирового.

- Центральная и северная части Северной Америки (юго-западные, южные и юго-восточные районы Канады и северные районы США), прилегающие к Кордильерам и Лаврентийской возвышенности в бассейнах рек Колумбия, Миссури, Черчилл, Святого Лаврентия – около 500 млрд кВт·ч или 15% мирового.

- Скандинавский полуостров (Норвегия, Швеция и, в меньшей степени, Финляндия), склоны и отроги Скандинавских гор, бассейны рек Гломма, Вефсна, Намсен, Лулеэльв, Умеэльв, Оунайсйоки, Кемийоки и др. – более 230 млрд кВт·ч, что составляет 7% выработки гидроэлектроэнергии в мире и 43% в Европе.

Таким образом, на этих пяти массивах, занимающих примерно 25-30% площади земной суши, вырабатывается около 75% гидроэлектроэнергии мира. При этом, гидроэнергетический потенциал Латинской Америки, Азии и, тем более, Африки остаётся в значительной степени неосвоенным.

Можно выделить ещё ряд территорий с высоким гидроэнергетическим потенциалом и существенным производством электроэнергии на ГЭС. В Европе это, прежде всего, горные и предгорные южные районы – Пиренеи, Альпы, Апеннины. К числу крупных европейских производителей энергии за счёт ГЭС относятся Швейцария, Австрия, Франция, Италия. Среди развитых стран выделяются также Исландия, где на ГЭС приходится 70% выработки всей электроэнергии и Новая Зеландия, где на ГЭС приходится более 52%. Это примеры небольших стран с высоким природным и технико-экономическим потенциалом ВИЭ, который они активно используют, обес-

печивая себя энергией, главным образом, за счёт ВИЭ. Соответственно, 100 и 72% выработки электроэнергии в этих странах приходится на ВИЭ в целом. В этом же ряду находятся и далеко не самые богатые и развитые азиатские и африканские страны.

Крупным производителем гидроэлектроэнергии с высоким гидроэнергетического потенциалом является Япония, на которую приходится 75 млрд кВт·ч или 2% мирового производства гидроэлектроэнергии. В то же время при общих размерах японской экономики и связанных с ней больших объёмах производства электроэнергии доля ГЭС невысока по сравнению с большинством стран со сходными природными условиями.

В России значительные ресурсы и объёмы производства гидроэлектроэнергии связаны также с горными территориями Кавказа, Южной Сибири, Дальнего Востока, а также с соседними со Скандинавией связанными с Балтийским щитом Кольским полуостровом и Карелией. Отметим, что роль каскада ГЭС на Волге снижается – на них в настоящее время приходится около 3% всей выработки электроэнергии в стране и менее 20% гидроэлектроэнергии. Одна Саяно-Шушенская ГЭС на Енисее по мощности и потенциальной выработке электроэнергии сопоставима со всем волжским каскадом.

Россия относится к числу ведущих мировых производителей электроэнергии на ГЭС. На нашу страну приходится более 160 млрд кВт·ч в год или 5% мирового. По выработке Россия занимает пятое место в мире после Китая (850 млрд), Бразилии (411 млрд), Канады (377 млрд) и США (276 млрд кВт·ч). В то же время, гидроэнергетический потенциал России также остаётся освоенным далеко не в полной мере – прежде всего, это относится к территориям к востоку от Урала. Представление о масштабах недоиспользования потенциала гидроэнергии может дать сопоставление с Канадой – страной, сходной с Россией по природным условиям и сопостави-

мой по территории, где общий объём производства электроэнергии на ГЭС выше в 2,3 раза, а плотность производства (кВт·ч на 1 км<sup>2</sup> площади страны) – выше в 3,9 раз.

Что же касается стран бывшего СССР, то значительным гидроэнергетическим потенциалом, также далеко не полностью используемым, обладают страны Закавказья и Средней Азии (прилегающие к Памиру и Тянь-Шаню). На гидроэнергетику приходится 95% всей вырабатываемой электроэнергии в Таджикистане, 94% – в Киргизии, более 75% – в Грузии, 30% – в Армении, 22% – в Узбекистане, 8,8% – в Казахстане, 8,3% – в Азербайджане.

Добавим, что крупнейшие ГЭС также построены в обозначенных выше регионах мира – в частности, «Три ущелья» и Силоду на реке Янцзы в Китае (22,5 и 13,9 ГВт), Итайпу на реке Парана на границе Парагвая и Бразилии (14 ГВт), Гури на реке Карони в Венесуэле (10,2 ГВт) и др. В этом перечне самая крупная российская ГЭС (Саяно-Шушенская, 6,4 ГВт), занимает примерно 9-10 место. В этих же регионах в настоящее время проектируется и строится ещё ряд крупных и сверхкрупных ГЭС.

### *Энергетика на ВЭР – закономерности размещения.*

Если рассматривать ВЭР без учёта ГЭС, а включая только геотермальную, солнечную, ветровую и биологическую энергию, то и тогда зависимость от природно-географических условий не отменяется. Всего на долю ВЭР, помимо ГЭС, приходится 5% мирового производства электроэнергии или 1069 млрд кВт·ч в 2012 году. Выделим регионы и отдельные стран, где доля ВЭР без ГЭС выше среднемировой (табл. 8).

Среди развитых стран существуют свои пространственные различия. В частности, лидерами (с большими абсолютными объёмами и высокой долей в структуре) производства по видам источников являются: Исландия, Италия – **геотермальная**, Испания, Германия, Великобритания, Италия,

Дания, Португалия, Ирландия – **ветровая**, Германия, Италия, а также Испания – **солнечная** и Германия, Великобритания, Италия, Швеция, Финляндия, Дания, Польша, Нидерланды – **биоэнергетика**.

Геотермальная энергетика чётко привязана к определённым геолого-тектоническим условиям. Ветровая энергетика в наибольшей степени развита на атлантическом побережье. Развита солнечная энергетика в большей степени характерна для юга Европы и Средиземноморских стран. Биоэнергетика в большей степени развита в Центральной и Северной Европе, что можно связать с развитым сельским и лесным (в Финляндии и Швеции) хозяйством.

Таблица 8. Доля в производстве электроэнергии на основе ВЭР (кроме ГЭС) по странам и регионам, 2012 г. ЕИА, 2013.

Регионы/страны мира	ВЭР (кроме ГЭС), %	Гео- терм., %	Ве- тер, %	Солн- це, %	Биомас са, %
Северная Америка	5,4	0,3	3,3	0,1	1,7
США	5,7	0,4	3,5	0,1	1,8
Центральная и Южная	5,0	0,7	0,8	0,0	3,6
Страны Центральной	17,4	8,1	2,6	0,0	6,6
Страны Карибского бас-	1,6	0,1	0,6	0,0	0,9
Бразилия	7,5	0,0	0,9	0,0	6,6
Др. страны Южной Аме-	3,1	0,0	0,2	0,0	2,8
Европа	13,0	0,3	6,1	2,1	4,4
Страны СНГ	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2
Азия, страны Ближнего	0,7	0,1	0,5	0,0	0,1
Африка	1,0	0,2	0,3	0,0	0,3
Азия (кроме Ближнего	3,1	0,3	1,6	0,2	1,1
Австралия	4,2	0,0	2,6	0,6	1,0
Новая Зеландия	20,6	14,3	4,8	0,0	1,5
Папуа-Новая Гвинея	11,9	11,9	0,0	0,0	0,0
Океания	1,0	0,0	0,7	0,0	0,3
<b>Всего в мире</b>	<b>5,0</b>	<b>0,3</b>	<b>2,4</b>	<b>0,4</b>	<b>1,8</b>

Таблица 9. Источники ВЭР и регионы с высоким уровнем развития энергетики на основе данного источника. ЕИА, 2013.

Источник энергии	Регион, страна	Доля источника в собственном производстве электроэнергии	Доля в мировом пр-ве энергии из данного источника
Геотермальная	Исландия	29,9	7,3
	Италия	2,0	8,8
	Юго-Восточная Азия и Океания: Филиппины, Индонезия, Папуа – Новая Гвинея, Новая Зеландия	5,1-14,7	38,7
	Восточная Африка: Кения	19,7	2,9
	Центральная Америка: Мексика, Сальвадор, Гватемала, Никарагуа, Коста-Рика, Гваделупа	2,1-24,8	14,7
	США	0,4	23,5
	Всего	95,9	
Биоэнергия	Центральная и Южная Америка	В среднем 3,6 (47,3 – Белиз; 6,6 – Бразилия)	13,5
	Центральная и Северная Европа: Германия, Великобритания, Бельгия, Польша, Швеция, Финляндия	6,6-16,4	26,6
	США	1,8	18,5
	Китай	0,9	11,7
	Япония	3,4	8,6
	Всего	78,9	
Ветро-вая энергия	Европейские страны на Атлантическом побережье: Германия, Великобритания, Дания, Франция, Португалия	2,8-35,5	30,6
	Страны Карибского бассейна и острова Атлантического океана: Аруба, Гваделупа, Ямайка, Нидерландские Антилы, Фолклендские острова	2,6-16,7	0,06
	США	3,5	27,1
	Всего	57,7	
Солнечная энергия	Центральная и Южная Европа: Германия, Испания, Италия	4,3-6,7	59,4
	Япония	0,7	7,3
	Китай	0,1	6,3
	США	0,1	4,2

	Всего	77,2	
--	-------	------	--

Германия, занимающая центральное положение в Европе, отличается равномерно высоким развитием всех типов энергетики на ВИЭ, кроме геотермальной. При этом геотермальная энергетика практически полностью отсутствует где-либо, кроме Исландии и Италии, а солнечная отсутствует в странах Северной Европы.

Кроме того, наиболее высокая доля ВИЭ в энергобалансе характерна для небольших стран – Дания (50,7%), Португалия (31,7%), Исландия (29,9%).

В общей структуре мирового производства электроэнергии на ВИЭ (без учёта ГЭС) на Западную Европу и Северную Америку приходится более 65% мирового производства, с Китаем, Японией, Южной Кореей и Австралией – более 70%, хотя этот показатель вместе с общей долей этих стран в производстве электроэнергии постепенно снижается. Тем не менее, фактор общего экономического развития страны здесь играет ключевую роль, и доля ведущих стран мира в производстве ветровой, солнечной и биоэнергии выше их доли в общем мировом производстве электроэнергии.

В то же время, мы видим, что существуют и природно-географические факторы, создающие сложную мозаичную картину с разнообразными региональными особенностями.

Основная часть геотермальной энергетики привязана к Огненному поясу Земли или Тихоокеанскому вулканическому кольцу. К этому поясу относятся острова Восточной, Юго-Восточной Азии и Океании на западном побережье Тихого океана и Америка (Центральная и западная часть Северной, в частности, запад США) на другой его стороне. Сюда же входит Япония, где на данный момент на геотермальную энергетику приходится 4,4% мирового объёма, сюда же входят российские Сахалин, Курильские острова и Камчатка, где геотермальная энергетика обеспечивает около 30% энергопотребления Камчатского края (Паужетская ГеоЭС – 42,5 млн

кВт·ч, Верхне-Мутновская – 63,0 млн кВт·ч МВт, Мутновская – 344,0 млн кВт·ч).

Три других заметных очага развития геотермальной энергетики отличаются сходными геолого-тектоническими условиями. Это Исландия, где повышенный потенциал геотермальной энергии связан со Срединно-Атлантическим хребтом, Италия, находящаяся в Альпийско-Гималайской зоне высокой тектонической активности и Кавказ. Третий очаг – Восточно-Африканский рифт. Наибольших успехов в геотермальной энергетике здесь достигла Кения, но существуют планы развития геотермальной энергетики и в других восточноафриканских странах (см. Нефедова Л.В. «Использование возобновляемых источников энергии в странах Африки для устойчивого развития и снижения эмиссии парниковых газов»).

Более сложная картина в биоэнергетике, в которой уровень развития определяется комбинацией высокой естественной продуктивности биосферы, развитого сельского хозяйства, лесопромышленного комплекса и общим экономическим уровнем развития страны. Ведущие позиции в биоэнергетике занимают Северная и Центральная Европа, США, Центральная и Южная Америка и восточноазиатский кластер, включающий Китай и Японию. В России биоэнергетика в данный момент не играет какой-либо роли в общем производстве электроэнергии. Но в досточной степени развитие получила в северо-западных районах, а также на юге Сибири и Дальнего Востока. Связано это с тем, что Россия является одним из ведущих мировых производителей (наряду с Канадой, США и скандинавскими странами) древесных пеллет на базе развитого лесопромышленного комплекса, основная часть которых в настоящее время идёт на экспорт в страны Западной Европы, а в последнее время также и Восточной Азии. Кроме того, рост спроса позволит развивать внутренний рынок биоэнергетики.

Развитие ветроэнергетики в ещё большей степени определяется общим экономическим уровнем развития страны или региона. В то же время, наблюдается определённая неравномерность внутри развитых стран. Ветроэнергетические мощности Европы концентрируются, прежде всего, в странах атлантического побережья, в зонах стабильных и сильных ветров. В дополнение к этому обозначается очаг развития ветроэнергетики на Антильских островах и других островных территориях (Фолклендские острова), что имеет те же естественные предпосылки. В целом, наиболее перспективно использование ветроэнергии в прибрежных зонах, а также на открытых континентальных пространствах (в частности, в степях).

Солнечная энергетика, на данный момент, вероятно, в наибольшей степени из всех возобновляемых источников, зависит от общего экономического уровня развития. Большую часть мировой выработки солнечной электроэнергии приходится на Китай, Германию, Японию, США и Италию.

Природно-географические условия в наибольшей степени действуют на размещение объектов гидроэнергетики, геотермальной и биоэнергетики.

С учетом географических особенностей можно выделить следующие пояса развития возобновляемых источников энергии (кроме гидроэнергетики):

- Тихоокеанский геотермальный (связанный с Тихоокеанским огненным кольцом Земли).
- Три биоэнергетических – Северный, Центрально-Южноамериканский и Восточноазиатский.
- Североатлантический ветровой.
- Средиземноморский солнечный.

В солнечной и ветроэнергетике – отраслях со сравнительно недавней историей масштабного развития – на первое место выходят факторы общегэкономического и технологического развития в сочетании с целенаправленной государственной политикой стимулирования.

Потенциально дальнейшее развитие возобновляемой энергетики в мире может быть связано с освоением новых территорий с благоприятными природными условиями. Географический фактор развития возобновляемой энергетики будет усиливаться. Это связано как с распространением технологий из стран Центра («триада» Северная Америка, Европа, Япония) в страны Полупериферии и Периферии (см. Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестник МГУ: Сер. 5. География. 2013. №1), так и с общими тенденциями развития возобновляемой энергетики [9].

На Россию данные закономерности также распространяется. В частности, развитие геотермальной энергетики в нашей стране связано, прежде всего, также с территориями Тихоокеанского огненного кольца (Камчатка и Курильские острова). Биоэнергетика в России представлена в настоящее время, главным образом, производством древесных пеллет, в свою очередь, связанных, большей частью, с предприятиями лесоперерабатывающего комплекса на севере и северо-западе европейской части страны, а также юга Сибири и Дальнего Востока – то есть, с частью Северного биоэнергетического пояса. Проекты в ветроэнергетике связаны, большей частью, со степными и прибрежными (Североатлантический ветровой пояс) районами, в солнечной энергетике – с югом европейской части России (продолжение Средиземноморского солнечного пояса). Основная часть гидроэнергетических мощностей России связана с горами и предгорьями Южной Сибири, Кавказа, а также зоной Скандинавского щита (Кольский полуостров и Карелия).

### ***Экономические и технологические аспекты изучения ВЭР***

Информация о валовом потенциале ВЭР собрана, в целом, в достаточном количестве, и методики его оценки проработаны. Главные вопросы в данный момент связаны с исследованием возможностей и перспектив использования ВЭР в экономике, исходя из комплекса природных, технологических и хозяйственных факторов, прежде всего – на региональном и локальном уровнях.

В последние годы развитие энергетики на основе использования ВЭР в целом столкнулось с рядом технологических и, как следствие, экономических барьеров, и с 2010-х гг. фиксируется его замедление (рис. 2).

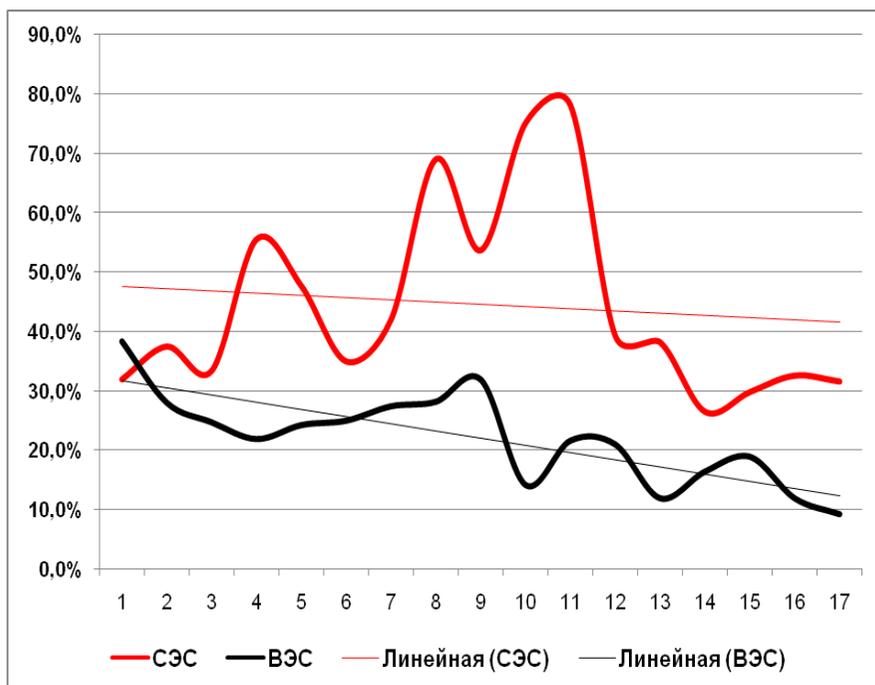


Рис. 2. Темпы роста мощностей в ветровой и солнечной энергетике в 2001-2017 гг., по данным [52].

Кроме того, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ; аналог коэффициента загрузки оборудования) солнечных и ветровых энергетических систем за последние 15-20 лет также существенно не вырос (табл.10).

Таблица 10. Изменение КИУМ солнечных фотовольтаических и ветровых электростанций в 2001-2017 гг., по данным [52, 63]

Год	Солнечные станции			Ветростанции		
	Установл. мощности, МВт	Произ-во электроэнергии млрд. Квтч	КИУМ	Установл. мощности, МВт	Пр-во эл.-энергии млрд. Квтч	КИУМ
2001	1 059	2	<b>23,7%</b>	23 894	38	<b>21,3%</b>
2002	1 457	2	<b>20,6%</b>	30 591	53	<b>22,1%</b>
2003	1 944	3	<b>18,2%</b>	38 153	64	<b>21,4%</b>
2004	3 025	3	<b>15,1%</b>	46 507	84	<b>22,7%</b>
2005	4 469	4	<b>13,3%</b>	57 790	104	<b>22,8%</b>
2006	6 035	6	<b>12,4%</b>	72 240	132	<b>23,1%</b>
2007	8 574	7	<b>11,6%</b>	92 064	171	<b>23,7%</b>
2008	14 497	12	<b>11,8%</b>	118 035	220	<b>23,9%</b>
2009	22 293	20	<b>12,3%</b>	155 740	276	<b>23,0%</b>
2010	39 059	32	<b>11,8%</b>	177 747	342	<b>23,4%</b>
2011	69 599	61	<b>12,8%</b>	216 185	446	<b>25,9%</b>
2012	96 966	101	<b>13,8%</b>	261 525	524	<b>25,0%</b>
2013	134 048	139	<b>13,7%</b>	292 630	646	<b>26,6%</b>
2014	169 642	198	<b>14,9%</b>	340 611	712	<b>25,7%</b>

2015	220 284	260	<b>15,2%</b>	405 022	832	<b>25,5%</b>
2016	292 170	328	<b>14,6%</b>	453 146	960	<b>25,5%</b>
2017	384 621	443	<b>14,9%</b>	494 821	1 123	<b>27,0%</b>

При этом, как было показано ранее (табл.1), общая доля ВЭР в мировом энергобалансе за последние 40-50 лет практически не выросла, оставаясь на уровне немногим выше 10%.

В дополнение со стороны ряда специалистов появляются критические оценки перспектив возобновляемой энергетики, в частности [21, 25].

При этом аргументы, звучавшие в пользу ВЭР в конце XX века – экологическая угроза и дефицит «традиционного» углеводородного топлива, в настоящее время несколько потеряли остроту и выглядят слабее, отчасти потому, что самые пессимистичные прогнозы просто не оправдались. При этом, после мощного роста цен на нефть в первом десятилетии XXI века мы наблюдаем очередное сильное снижение.

Фундаментальная причина, тормозящая рост использования ВЭР, заключается, прежде всего, в самой природе данных энергоресурсов – высокой степени их изменчивости и непредсказуемости во времени и пространстве. Кроме того, в ряде случаев существуют и свои технологические пределы.

В частности, А.А. Соловьёв [22] обращает внимание на базовый принцип ветроэнергетики Жуковского – Бетца, ограничивающий мощность ветряного колеса и коэффициент преобразования энергии. В соответствии с этим принципом, КИУМ даже в идеальной ветроустановке не может превышать 59,3% (рис. 3).

Точка зрения ещё целого ряда специалистов заключается в том, что некоторые пределы развития технологий ветроэнергетики уже достигнуты.

Примерно то же можно сказать о гидроэнергетике, функционирующей на сходных с ветроэнергетикой принципах, а

также геотермальной энергетике, биоэнергетике, тепловой солнечной энергетике, технологически сходных с обычными тепловыми электростанциями (ТЭС), работающими на ископаемых углеводородах.

Большой резерв роста сохраняется, вероятно, у фотовольтаической солнечной энергетике. К настоящему времени КПД солнечных батарей вырос до 20%-25%; максимальный достигнутый в лаборатории КПД солнечных элементов превышает 40%. За последние 10-20 лет произошло кардинальное снижение стоимости солнечных элементов – с величин более \$10 до менее \$1 за 1 Ватт мощности.

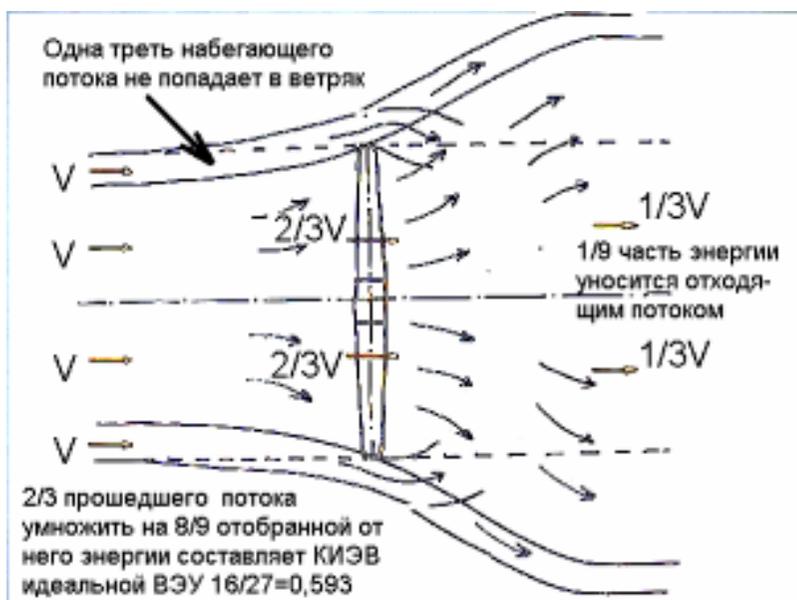


Рис. 3. Иллюстрация принципа Жуковского - Бетца

Ключевые свойства материалов для солнечных элементов, определяющие стоимость – способность поглощать солнечный свет в наиболее широком диапазоне длин световых

волн и толщина поглощающей поверхности, при которой происходит поглощение света. Для разных материалов она составляет от 100 до 1 мкм и менее, что определяет расход материала и, соответственно, цену. На данный момент разрабатываемые и за рубежом, и в России, тонкоплёночные материалы позволят, в перспективе, достигать КПД 90% и выше. Другие факторы повышения КПД солнечных элементов – использование концентрированного солнечного излучения (солнечных концентраторов), создание полимерных солнечных элементов и наноструктур на основе кремния и фуллеренов.

Также ключевой проблемой остаётся аккумуляция энергии, учитывая нестабильный характер поступления ВЭР в течение не только суток, но и сезонов. Аккумулирующих систем, способных сглаживать сезонные колебания, пока нет, во всяком случае – с приемлемой стоимостью. В качестве перспективных в долгосрочном плане технологий на данный момент рассматриваются водородные и редокс (проточные) – аккумуляторы.

С точки зрения исследования и мониторинга ВЭР следует отметить их изменчивость не только в пространстве, но и во времени. Изменения природной среды – как естественные, так и антропогенные, влияют и на объёмы ВЭР, как на локальном и региональном, так и на глобальном уровнях. В частности, изменения климата в настоящее время сказываются на объёме гидроэнергетических (уменьшение или увеличение водности рек) и ветровых (изменение силы ветра) ресурсов. На объёмах биоресурсов сказывается изменения структуры хозяйства и объёмов производства продукции сельского хозяйства и лесопереработки. В связи с этим, система мониторинга ВЭР сохраняет актуальность.

Следующее направление исследований – поиск территорий, где использование ВЭР наиболее оправданно экономически, в том числе, детализация и типология на локальном уровне. В зависимости от природной и хозяйственной специ-

фики территории стоимость энергии, полученной с использованием ВЭР, может меняться в десятки раз, а её ценовая конкурентоспособность с энергией, получаемой от ископаемых энергоносителей, полностью зависит от конкретных условий территории.

Прогнозы относительно развития технологий использования ВЭР не могут отличаться высокой точностью, однако мы можем строить некоторые предположения, анализируя, например, длинные волны экономической конъюнктуры, о чём было упомянуто в Главе 1. Вероятно, в ближайшие 10-20 лет нас ждёт определённая перегруппировка, период ожидания параллельно с продолжением научно-исследовательских работ, после чего возможная новая фаза роста, связанная уже, в большей степени, с Четвёртой промышленной революцией, выделяемой К. Швабом [24].

Экологические и ресурсные стимулы и аргументы также в долгосрочной перспективе работают в пользу ВЭР, однако «каменный век закончился не потому, что закончились камни» (это известное высказывание приписывается разным авторам), и представляется, что решающим фактором будет технолого-экономический – если будет достигнута должная экономическая эффективность использования ВЭР.

## **Глава V. Технологический прогресс в возобновляемой энергетике**

### *Элементы технологического форсайта в области возобновляемых источников энергии для промышленной политики России.*

Доступная и чистая энергия для всех была провозглашена Организацией Объединенных Наций глобальной целью № 7 в области устойчивого развития. Ключевым механизмом успешного достижения этой цели являются исследования и разработки, ведущие к техническому прогрессу. Здесь мы анализируем национальный путь России к устойчивому развитию энергетики.

34 технологических платформы по ключевым направлениям: медицина и биотехнологии, информационные и коммуникационные технологии, фотоника, авиакосмическая промышленность, ядерные технологии, энергетика, транспорт, новые материалы и металлургия, добыча природных ресурсов, технологии производства и экология. Несмотря на то, что они были инициированы в трудное посткризисное время, они представляют собой дорожные карты для ускоренного развития в контексте экономики России до 2030 года. Технологические платформы представляют собой эффективную форму государственно-частного партнерства, широко применяемую в современном мире. Возобновляемые источники энергии постепенно обгоняют традиционные формы, особенно с точки зрения инвестиций, привлекая более 70% новых капитальных затрат. Значительная часть этого притока (до 10%) идет на исследования и разработки. Чтобы правильно направить финан-

сирование, необходимо обозначить направления технического прогресса. И здесь мы обсуждаем идеи глобального технологического форсайта в 6 областях: биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, энергия ветра, солнечная энергия и морская энергия.

По данным Организации экономического сотрудничества и развития, мировые расходы на исследования и разработки (НИОКР) составляют 1200 миллиардов долларов США ежегодно. Национальные цифры сильно различаются, например, сумма НИОКР в России составляет 1% ВВП, а в Республике Корея - 2,7% ВВП. Около 10 миллиардов долларов США - 0,8% от общей суммы - направляются на исследования и разработки в области возобновляемых источников энергии. Чтобы эффективно направлять эти средства как в коммерческих целях, так и через государственный бюджет, необходимо определить технологические приоритеты в области возобновляемых источников энергии. Здесь мы обсуждаем идеи глобального технологического форсайта в 6 областях: биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, энергия ветра, солнечная энергия и морская энергия.

Возобновляемая энергия (ВИЭ) - это настоящий высокотехнологичный сектор с двузначными ежегодными темпами роста, привлекающий внутренние и международные инвестиции, поэтому это окно возможностей на потенциально обширном российском рынке. Главный вопрос здесь - соответствуют ли российские технологические платформы мировым тенденциям развития ВИЭ.

Начиная с 2011 года в рамках промышленной политики России было создано 34 технологических платформы по ключевым направлениям: медицина и биотехнологии, информационные и коммуникационные технологии, фотоника, авиакосмическая промышленность, ядерные технологии, энергетика, транспорт, новые материалы и металлургия, добыча природных ресурсов, технологии производства и экология. Несмотря на то, что они были инициированы в тяжелое по-

сткризисное время, они представляют собой дорожные карты для ускоренного развития в контексте экономики России до 2030 года.

Среди этих направлений 4 связаны с возобновляемой энергией: 1) «Биоэнергетика», 2) «Перспективные технологии возобновляемой энергии», 3) «Малые децентрализованные энергетические системы» и 4) «Ресурсы океана».

Мировые расходы на НИОКР в области возобновляемых источников энергии достигли своего пика в 2010 году и составили 10 миллиардов долларов США по сравнению с примерно 5 миллиардами долларов США в 2004 году. Это было время как раз перед резким увеличением общих инвестиций в возобновляемые источники энергии и соответствующим резким падением возобновляемой энергии расходы. С тех пор бюджеты НИОКР упали до уровня 8 миллиардов долларов США в 2016 году.

Здесь замешаны две большие группы - это правительства и частные корпорации. До 2015 года расходы на НИОКР распределялись между этими двумя участниками равномерно - около 50% / 50%. Совсем недавно корпоративные НИОКР начали сокращаться, и теперь государственные НИОКР составляют 70% от общей суммы (5,5 млрд долларов США в год в абсолютном выражении в 2016 году). Государственные расходы продолжали расти на протяжении всех 2010-х годов.

Географически Европейский Союз (ЕС) по-прежнему является лидером в области исследований и разработок в области возобновляемых источников энергии, за которым следует Китай. В отраслевой разбивке большая часть финансирования идет на солнечные исследования, до 50% от общего объема (3,6 миллиарда долларов США в 2016 году), далее идет биотопливо - 1,7 миллиарда долларов США.

Бюджеты исследований в области солнечной энергии и ветра упали на 30-40% по сравнению с началом 2010-х годов. Доля расходов на НИОКР в общих инвестициях снизилась с 5% в 2010 году до менее 3% в 2016 году, что является четким

показателем зрелости отрасли. Эта тенденция закрепилась вместе с увеличением установленной мощности с 2011 года.

Технологическая площадка №3. Биоэнергетика

Цель: сформулировать концепцию развития и дорожную карту реализации национального биоэнергетического сектора.

Координатор: Федеральный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Направления:

- Адаптация и интеграция биоэнергетики в контекст существующего энергетического сектора.
- Технологии производства непищевой биомассы в промышленных масштабах.
- Улавливание CO<sub>2</sub> и преобразование в биомассу
- Утилизация сельскохозяйственных, промышленных и городских органических отходов.
- Ферментация непищевой биомассы до биогаза
- Каталитическая переработка биомассы в жидкое топливо, спирт и биодизель
- Выбор видов и биоинженерия

Технологическая площадка №9. Малые распределенные энергетические системы

Цель: разработка типовых модулей оборудования и проектирование небольших распределенных систем энергоснабжения.

Координаторы: «Агентство прогнозирования баланса электроэнергии», компания «Интер РАО ЭС».

Направления:

- Объединить стандартные блоки генерации, локальные сети, управление и автоматизацию, хранение
- Минимизация затрат на развертывание и распространение, сокращение производственных затрат.
- Сформулировать дорожную карту для рыночных, институциональных и научных условий.
- Сформулировать стратегический план внедрения НИОКР и инноваций в области малых энергетических систем.

Переход от централизованного энергоснабжения к комбинации диверсифицированных энергетических систем, адаптированных к потребительскому спросу и местным условиям

Технологическая площадка №18. Ресурсы океана

Цель: разработать набор прорывных технологий для разработки морских ресурсов.

Координатор: Федеральный научный центр «Концерн МПО Гидроустройство».

Направления:

- Соедините государственно-частное партнерство и научные исследования

- Акцент в настоящее время на добыче газа и нефти на морском шельфе.

- Роботизированные системы для надводного и подводного применения.

- Судовые объекты энергоснабжения прибрежных городских районов (включая атомную энергетику)

- Особые возможности для развития приливной энергетики в Охотском море (Тугурский проект, 20 ГВт)

Обширный потенциал минеральных, био- и энергетических ресурсов в 3 океанах. 5 млн км<sup>2</sup> - национальная исключительная экономическая зона в Тихом океане

Технологическая площадка №19. Перспективные технологии возобновляемой энергетики

Цель: ускорить внедрение технологий производства электроэнергии и тепла на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ)

Координатор: ОАО «Русгидро».

Направления:

- Разработать программу стратегических исследований. Координировать деятельность участников технологической платформы.

- Упрощение эксплуатации генераторов ВИЭ в существующей электросети.

- Утверждение тарифов на «зеленую энергию» на производство ВИЭ.
- Стандартизация оборудования, конструкции и эксплуатации
- Мониторинг и управление жизненным циклом проектов ВИЭ
- Международное сотрудничество в развитии ВИЭ. Россия присоединилась к Международной ассоциации сетей возобновляемой энергии (IRENA) в сентябре 2014 г.

### ***Национальные цели развития возобновляемой энергетики в России***

Первые национальные целевые индикаторы для возобновляемой энергетики были установлены в 2009 году. Согласно федеральной программе «Энергоэффективность и развитие энергетического сектора» к 2020 году в России должно быть установлено 6,2 ГВт новых генерирующих мощностей на основе возобновляемых источников. Таким образом, доля ВИЭ в национальном энергобалансе может достигают 2,5% по сравнению с 0,8% в настоящее время. Развертывание мощностей возобновляемых источников энергии мощностью 6,2 ГВт соответствует ежегодным инвестициям в 2 миллиарда долларов США в год. Средний показатель инвестиций в ВИЭ в России в 2005-2014 гг. Оценивается в 100 млн долларов США в год, что в 10 раз меньше заявленного уровня.

Для достижения целей развития возобновляемых источников энергии промышленность России должна следовать глобальным тенденциям в области исследований и разработок (НИОКР) в этом секторе. Мы оценили проблемы глобального технологического форсайта в 6-7 областях: биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, энергия ветра, солнечная энергия и морская энергия.

Оценка технологий. Технологии новой и возобновляемой энергии (NRE): в основном мы используем стандартный под-

ход к анализу затрат и выгод. Стадия исследований и разработок (НИОКР) требует особого подхода, полезно сравнение с аналогами. На этапе развертывания мы рассматриваем: 1) капитальные затраты, 2) затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, 3) общие затраты на электроэнергию в различных местах. Со стороны спроса мы пытаемся оценить: а) потенциальные области применения новой технологии; б) размер рыночной ниши. Особое внимание: национальная система ценообразования на энергию. Следует сделать общий вывод о конкурентоспособности конкретной энергетической технологии в сравнении с традиционным энергообеспечением.

### 1. Глобальные исследования и разработки в области гидроэнергетики

Инвестиционная стоимость - 1100-1700 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 816 ГВт по большой ГЭС плюс 280 ГВт по малой ГЭС (менее 25 МВт), всего 1096 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 5 центов США / кВтч.

- Никаких серьезных улучшений в технике
- Компьютерная автоматизация в технологиях мониторинга, диагностики, защиты и управления.
- максимизировать энергию, производимую из существующих проектов, за счет модернизации
  - Новые площадки для малых гидроэлектростанций.
  - гибридные системы крыло-гидро и производство водорода
  - Насосные хранилища и балансировка сети
  - Повышение эффективности. Снижение затрат на оборудование. Снижение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание. Повышение надежности и доступности

### 2. Глобальные исследования и разработки в области ветра

Инвестиционная стоимость - 1400-1700 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 487 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 6 центов США / кВтч [4].

- Масштабная интеграция ветряных турбин в электрические сети.
- Прогнозирование мощности, уменьшение неопределенности в выходной мощности
  - Экстремальные условия окружающей среды, безопасность, мощность и шум
  - Методы хранения
  - Более эффективные генераторы и преобразователи из электронной промышленности.
- Контроль электрической нагрузки и улучшение качества электроэнергии

### 3. Глобальные солнечные тепловые исследования и разработки

Инвестиционная стоимость - 5000-7000 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 5 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 22 центаUS / кВтч [4].

- Технология параболического желоба с использованием высокотемпературной жидкости (НТЖ) или прямого производства пара (DSG).

- Системы центрального ресивера (CRS), использующие: расплавленную соль, ресивер сжатого воздуха и тарельчатые системы Стирлинга.

- усовершенствование модульных компонентов - концентраторов, гелиостатов или модульных приемников.

- системы хранения пара под высоким давлением и сжатого и высокотемпературного воздуха - значительное снижение затрат на электроэнергию

- Оптимизация потерь энергии / эксергии

### 4. Глобальные исследования и разработки в области фотоэлектрической энергии (PV)

Инвестиционная стоимость - 1300-1700 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 303 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 10 центов США / кВтч.

1. Цель - очень низкая стоимость (при оптимизации эффективности):

- Улучшенные оксидные клетки.

- Органические солнечные элементы.
- Наноструктурированные материалы.

2. Цель - очень высокая эффективность (при оптимизации затрат):

- Многопереходные элементы для использования в концентраторах
- Новые концепции механизма преобразования
- Новый ресурс для производства кристаллического кремния.
- Снижение затрат на тонкопленочные технологии.
- Долговременная стабильность до 25 лет жизни.

Исследования и разработки в области материаловедения, физики и химии устройств, электроники, робототехники, строительных технологий, систем электропередачи и хранения.

### 5. Глобальные исследования и разработки в области биоэнергетики.

Инвестиционная стоимость - 1600-2600 долларов США / кВтч. Установленная мощность по выработке электроэнергии - 112 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 5 центов США / кВтч.

- Разработка концепции биоперерабатывающего завода для сырья биомассы.
- Биологическая конверсия для этанола, биогаза
- Анаэробное сбраживание биогаза
- Сжигание твердых бытовых отходов - электричество и тепло
- Производство биоэтанола и биодизеля из сахара, масличных культур и лигноцеллюлозы.
- Биоводород
- Доступность дешевого сырья: лесоводство с коротким оборотом, травы, солома, сточные воды.
- Увеличьте плотность энергии за счет гранулирования.
- Повышение эффективности конверсионных процессов при снижении их затрат.

### 6. Глобальные геотермальные исследования и разработки

Инвестиционная стоимость - 2900-3300 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 14 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 7 центов США / кВтч.

- Разработка глубоких (> 3000 м) геотермальных ресурсов.
- Разработка горячих сухих горных пород.
- Увеличение геотермальной комбинированной выработки электроэнергии и тепла.
- Снижение затрат на бурение, каротаж и заканчивание геотермальных скважин.
- Геотермальные системы прямого действия, включая геотермальные тепловые насосы и отопление помещений.
- Анализ жизненного цикла, устойчивость производства геотермальной энергии
- Улучшенные циклы эффективности преобразования, оптимизация эксергии
- Наведенная сейсмичность на геотермальных участках

### 7. Исследования и разработки в области глобальной океанической и морской энергетики

Инвестиционная стоимость - 2000-5000 долларов США / кВтч. Установленная мощность - 0,5 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - более 20 центов США / кВтч.

- Системы приливных течений на базе подводных турбин (перенос турбин и роторов из судостроительной промышленности).
- Градиент солености (эффективные мембраны).
- Преобразование тепловой энергии океана (ОТЕС)
- Оценка и мониторинг ресурсного потенциала
- Волновые энергетические системы.
- Совершенствование систем отбора мощности.

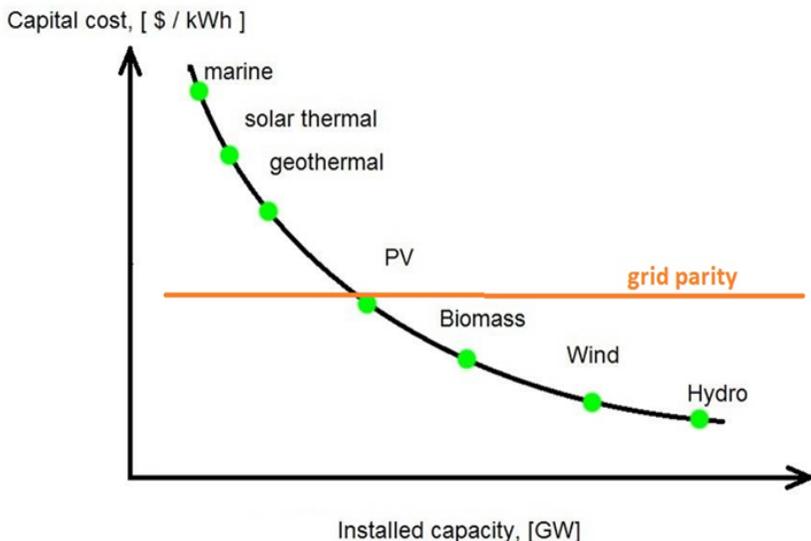


Рис.4. Инструмент оценки технологий: кривая обучения

На рисунке 4 показано относительное положение 7 макротехнологий возобновляемой энергетики на основе кривой обучения - инструмент оценки технологий. Картина качественная (на оси нет конкретных единиц), но правильно отражает уровень зрелости и структуру сектора возобновляемой энергетики. Зеленая точка сразу под горизонтальной красной линией представляет солнечные фотоэлектрические технологии производства электроэнергии, демонстрирующие ключевое достижение возобновляемых технологий в 2010-х годах - солнечные фотоэлектрические установки для коммунальных предприятий достигли рентабельности даже без каких-либо субсидий, их производственная стоимость упала ниже паритета сети.

## *К низкоуглеродному будущему*

Внедрение и расширение набора технологий использования возобновляемых источников энергии, описанных выше, ведет к менее ориентированной на углерод энергетической системе. Первые признаки так называемого «грандиозного перехода» к этой новой системе проявляются в области инвестиций в энергетику.

Доля ископаемых видов топлива в общих инвестициях в энергию резко снизилась в 2014–2016 годах, приблизившись всего к 50% (десять лет назад было около 70%). Рост сместился в сторону возобновляемых источников энергии, сетей, хранилищ и энергоэффективности. Они увеличивают свою долю за счет окаменелостей.

Доля возобновляемых источников энергии увеличилась с 16% до 17%, сетей с 12% до 14%, а инвестиции в повышение эффективности достигли 12% от общего объема в 2015 году по сравнению с 10% в 2014 году.

В 2015 году инвестиции в повышение энергоэффективности достигли 221 миллиарда долларов США, что составляет 12% от общих расходов в прошлом году и на 6% больше, чем в предыдущем году.

Инвестиции в разведку и добычу нефти и газа в период с 2014 по 2016 год сократились на 44%. В абсолютном выражении инвестиции в энергию в мировой экономике составили 1 830 миллиардов долларов США в 2015 году, что на 8% меньше, чем в предыдущем году, в основном из-за сокращения добычи нефти и газа.

Расходы на производство электроэнергии достигли 420 миллиардов долларов США, из которых около 70% составляют возобновляемые источники энергии, или 288 миллиардов долларов США.

Расходы на все возобновляемые источники энергии, включая биотопливо для транспорта и солнечные тепловые установки, составили 313 миллиардов долларов США в рам-

ках широкой переориентации инвестиций в сторону низкоуглеродных источников энергии.

В Китае, который является крупнейшим инвестором в энергетику по размеру, в инвестициях в новую энергию преобладают расходы на возобновляемые источники энергии, сети и энергоэффективность. Таким образом, в 2016 году введено на 25% меньше угольной мощности по сравнению с 2015 годом.

Учитывая отставание во времени, на 5-7 лет вперед, в середине 2020-х годов мы должны испытать установление новой структуры энергобаланса в глобальном масштабе и в отдельных странах. Будут соответствующие экономические и социальные последствия.

### Выводы

Производство возобновляемой энергии продолжало активно расти, достигнув почти 22% от мирового производства по сравнению с 18% в 2007 году. Инвестиции в новые мощности возобновляемых источников энергии превысили 270 миллиардов долларов США во всем мире в 2016 году и, вероятно, останутся на высоком уровне.

Уровень инвестиций в возобновляемые источники энергии в России должен быть значительно увеличен. Средний показатель инвестиций в ВИЭ в России в 2005-2014 годах оценивается в 100 миллиардов долларов США в год, что в 20 раз меньше требуемого уровня, заявленного в прогнозе правительства. Для достижения целей развития возобновляемых источников энергии промышленность России должна следовать глобальным тенденциям в области исследований и разработок (НИОКР) в этом секторе.

Ключевым компонентом инвестиций являются расходы на НИОКР (исследования и разработки). Доля расходов на НИОКР в общих инвестициях снизилась с 5% в 2010 году до менее 3% в 2016 году, что является четким показателем зре-

---

лости отрасли. Эта тенденция закрепилась вместе с увеличением установленной мощности с 2011 года.

Здесь мы определили глобальные проблемы технологического форсайта в 6 областях: биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, энергия ветра, солнечная энергия и морская энергия.

Доля ископаемого топлива в общих инвестициях в энергию резко снизилась в 2014-2016 годах. Рост сместился в сторону возобновляемых источников энергии, сетей, хранилищ и энергоэффективности. Они увеличивают свою долю за счет окаменелостей. Учитывая отставание во времени, на 5-7 лет вперед, в середине 2020-х годов мы должны испытать установление новой структуры энергобаланса в глобальном масштабе и в отдельных странах. Будут соответствующие экономические и социальные последствия.

## Заключение

Изучение ВЭР необходимо для целей их использования человеком, и одно неотделимо от другого, при этом использование ВЭР начинается существенно раньше их систематических исследований.

Использование ВЭР хорошо иллюстрирует диалектические законы: оно было повсеместным в ранние периоды человеческой истории, было вытеснено на второй план в связи с НТП, и обрело «второе рождение» в наше время на новом витке НТП – причём и новом уровне НТП как такового, и в связи с порождаемым ими проблемами. Также, с одной стороны, использование ВЭР сопряжено с архаичными уровнями технологического развития, с другой – с новейшими, в частности, нанотехнологическими, разработками.

Изучение ВЭР является широкой междисциплинарной областью, включающей как естественнонаучные, так и гуманитарные составляющие. Полноценное изучение ВЭР стало возможным в результате длительного развития нескольких комплексов наук и научно-технических знаний, включая:

- Фундаментальный естественнонаучный, исследующие общие закономерности природы – физику, химию, биологию; исследование энергии, гидро- и аэродинамику;
- Технологический, включающий разработку способов и инструментов использования ВИЭ;

- Географический, включающий исследование геосред, пространственных природных и хозяйственных закономерностей и, в свою очередь, разбивающийся на физико-географическое, гидрометеорологическое и экономико-географическое направление;

- Экономический, включающий исследование закономерностей экономического развития (концепции экономики инноваций, длинных волн экономического развития, отношений Центра и Периферии).

Путь от оформления науки в современном виде и первых в систематическом научном исследовании ВЭР до современных технологических систем их использования занял несколько сотен лет, с XVI века.

На современном этапе основные направления исследования ВЭР и возможностей их использования включают:

Мониторинг ВЭР и их изменчивости во времени и пространстве под влиянием комплекса природных и антропогенных факторов;

Разработка более совершенных технологий использования ВЭР;

Поиск территорий, экономико-географических и социально-экономических ниш, оптимальных для использования ВЭР.

В целом в изучении ВЭР и возможностей их использования наблюдается смещение от общего естественнонаучного к географическому и экономическому комплексу и от глобального к региональному и локальному уровню.

## Библиографический список

### Литература

1. Андреевко Т.И., Киселева С.В., Шакун В.П. К оценке энергетических потенциалов отходов растениеводства // *Альтернативная энергетика и экология*, 2014, №12, стр. 84-95
2. Бабурин В.Л. Инновационные циклы в российской экономике // Изд. 4-е, испр. и доп. М.: КРАСАНД, 2010.
3. Баденко Н.Н. и др. Разработка методологического обеспечения процесса автоматизированного вычисления гидроэнергетического потенциала рек с использованием геоинформационных систем // *Инженерно-строительные журнал*, №6/2013, с.62-76.
4. Безруких П.П. и др. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) // М.: «ИАЦ Энергия», 2007 – 272 с., С.4.
5. Вознесенский А.Н. Энергетические ресурсы СССР. М., «Наука», 1967. 598 с.
6. Григорьев С.В. Потенциальные энергоресурсы малых рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1946, 115 с.
7. Дегтярев К.С. Состояние и территориальная организация фотовольтаической солнечной энергетики в России // «*Окружающая среда и энергосбережение*», №1/2019, стр. 23-38.
8. Дегтярев К. С. Экономика возобновляемой энергетики в мире и в России // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. — 2017. — № 9. — С. 80–87.;
9. Дегтярев К. С., Берёзкин М.Ю. Географические особенности развития возобновляемой энергетики

- ки // География и рациональное использование возобновляемых источников энергии. Коллективная монография. Под ред. А.А. Соловьёва. М.: ИД «Энергия», 2019 — С. 139–146.
10. Дегтярев К. С., Берёзкин М. Ю., Залиханов А. М. Инвестиционные проекты в возобновляемой энергетике: экономический практикум. Учебное пособие под редакцией профессора А.А. Соловьёва. — М.: КДУ, 2018. — 98 с.
  11. Дегтярев К. С., Залиханов А. М., Соловьёв А. А., Соловьёв Д. А. План ГОЭЛРО и возобновляемые источники энергии. // Энергетическая политика. — 2016. — № 3. — С. 55–64.
  12. Дегтярев К. С., Соловьёв А. А. Мировые долгосрочные тенденции возобновляемой энергетики // XII Международная ежегодная научно-практическая конференция "Возобновляемая и малая энергетика - 2015", Сборник трудов. — Комитет ВИЭ РосСНИО Москва, 2015. — С. 106–116.
  13. Дюшен Б. Ветер – вода – солнце // Техника – молодежи, №5/1933, с.61-67.
  14. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры. М.: РАНИОН, 1928.
  15. Карцев В., Хазановский П. Тысячелетия энергетики. М., «Знание», 1984.
  16. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная, М., 1972; Кмито А.А., Скляр Ю.А., Пиргелиометрия, Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. — 233 с.
  17. Михайлов Л.П. Малая гидроэнергетика. М., «Энергоатомиздат», 1989.
  18. Панцхава Е.С. Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз: теория и практика: монография // М.: изд-во «Русайнс», 2014. – 972 с., с.752-755.

19. Гарнижевский Б.В. «Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России» // Теплоэнергетика, №5/1996.
20. Семёнов О.Ю., Бижан Д.В., Жосан В.О., Мовяк С.А., Струлис С.С. Наука гидродинамика: от древних цивилизаций до наших дней //Техника. Технологии. Инженерия. №1(01)/2016, с. 1-5.
21. Смил В. Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики. – М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2012 – 272 с.
22. Соловьёв А.А. Базовые принципы использования возобновляемых источников энергии //Возобновляемые источники энергии. Лекции ведущих специалистов, прочитанные на VI всероссийской научной молодёжной школе 25-27 ноября 2008 г., Москва, вып.5.
23. Стребков Д.С. История развития солнечной фотоэлектрической энергетики в России // Сборник трудов XII Международной ежегодной научно-практической конференции «Возобновляемая и малая энергетика – 2015», под. Ред. П.П. Безруких, С.В. Грибкова и др., с.266-278.
24. Шваб К. Четвёртая промышленная революция // «Эксмо», 2016.
25. Andersen, Otto. Unintended Consequences of Renewable Energy. Problems to be solved // Springer-Verlag London, 2013
26. Boyle G. Renewable energy. Oxford University Press, UK (2004).
27. BP Statistical Review of World Energy – 2018
28. Hoogwijk MM, On the global and regional potential of renewable energy, PhD thesis, Copernicus Institute for sustainable development and innovation, Utrecht University, Nietherland, 2004.

29. Painuly JP. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, 24 (1) (2001), pp. 73–89.
30. Soloviev A. , Degtyarev K. , Zalikhanov A., Chekarev K.. Regional and local geographical potentials of renewable energy sources in Russia. // International Geographical Union Regional Conference GEOGRAPHY, CULTURE AND SOCIETY FOR OUR FUTURE EARTH 17-21 August 2015, Moscow, Russia IGU 2015 Book of Abstracts. — Lomonosov Moscow State University. Faculty of Geography Москва, 2015. — P. 716–716.
31. Van Wijk, A.J.M. and J.P. Coelingh, 1993, Wind power potential in the OECD countries, Utrecht University, Department of Science, Technology and Society, pp:35.
32. World Energy Council, 1994, New renewable energy sources. A guide to the future, London, Kogan Page Limited.

### Электронные ресурсы

33. Актинометрия // БСЭ [электронный ресурс] URL: <https://slovar.cc/enc/bse/1971237.html>, дата обращения 03.04.2019.
34. Алексеевский Н.И. Гидрология. Курс лекций [электронный ресурс] URL: <http://www.geogr.msu.ru/cafedra/gydro/uchd/lekcii/gidro1k/lek10v2.pdf> , дата обращения - 01.04.2019.
35. АТС. Результаты отборов проектов [электронный ресурс] URL: <http://www.atsenergo.ru/vie/proresults> , дата обращения: 19.11.2018.
36. Гидрология // БСЭ [электронный ресурс] URL: <https://slovar.cc/enc/bse/1988003.html> , дата обращения 03.04.2019.

37. ГИС ВИЭ GIS RENEWABLE ENERGY SOURCES OF RUSSIA. [электронный ресурс] URL: <http://gisre.ru> , дата обращения – 03.04.2019.
38. ГИС ВИЭ GIS RENEWABLE ENERGY SOURCES OF RUSSIA. Нормативные документы [электронный ресурс] URL: <http://gisre.ru/useful/regulations> , дата обращения - 03.04.2019.
39. Ермоленко Б.В., Ермоленко Г.В., Рыженков М.А. Экологические аспекты ветроэнергетики// «Теплоэнергетика», 2011, № 11. [электронный ресурс]URL: <http://www.wes-south.ru/Ecology.pdf> (дата обращения – 29.03.2019).
40. Из истории создания гидрометеорологической службы России [электронный ресурс] URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/8983--13042014->, дата обращения – 03.04.2019.
41. История метеорологических наблюдений в России. Справка [электронный ресурс] URL: <https://ria.ru/20090113/159088547.html> , дата обращения – 03.04.2019.
42. Метеорология // БСЭ [электронный ресурс] URL: <https://slovar.cc/enc/bse/2017580.html> , дата обращения 03.04.2019.
43. Океан // БСЭ [электронный ресурс] URL: <https://slovar.cc/enc/bse/2024704.html> , дата обращения 03.04.2019.
44. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [электронный ресурс] URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/prom/en\\_balans.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/en_balans.htm)
45. Энергия. // БСЭ [электронный ресурс] URL: <https://slovar.cc/enc/bse/2062971.html> , дата обращения – 02.04.2019.

- 
46. Charles F. Brush [электронный ресурс] URL: [https://ethw.org/Charles F. Brush](https://ethw.org/Charles_F._Brush) , дата обращения - 01.04.2019.
47. Farooq M.K., Kumar S. An assessment of renewable energy potential for electricity generation in Pakistan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 20, April 2013, Pages 240-254 [электронный ресурс] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006545> , дата обращения - 29.03.2019.
48. Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components // Science. 1998 Jul 10;281(5374):237-40. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9657713> (дата обращения - 21.03.2019)
49. Geothermal. World Energy Council. 2013. [Электронный ресурс] // URL: [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WER\\_2013\\_9\\_Geothermal.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WER_2013_9_Geothermal.pdf) , дата обращения 29.03.2019.
50. International Energy Agency [Электронный ресурс] // URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf> дата обращения 29.03.2019.
51. International Energy Agency [Электронный ресурс] // URL: <https://www.iea.org/techinitiatives/renewableenergy/ocean/> / дата обращения 29.03.2019.
52. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/> дата обращения 29.03.2019.
53. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/bioenergy> , дата обращения 19.11.2018
54. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/geothermal> , дата обращения 19.11.2018

55. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/hydropower> , дата обращения 19.11.2018
56. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/ocean> , дата обращения 19.11.2018
57. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/solar> , дата обращения 19.11.2018
58. IRENA [электронный ресурс] URL: <http://irena.org/wind> , дата обращения 19.11.2018
59. Key World Energy Statistics. 2017 [электронный ресурс] URL: <https://www.iea.org/statistics/kwes/balances/> , дата обращения – 03.04.2019.
60. Norwegian Renewable Energy Partners [Электронный ресурс] // URL: <http://www.intpow.com/index.php?id=487&download=1> дата обращения 29.03.2019.
61. Resch G., Held A., Faber T., Panzer C., Toro F., Haas R.. Potentials and prospects for renewable energies at global scale. Energy Policy, 36 (11) (2008), pp. 4048–4056. [электронный ресурс] URL: [http://ac.els-cdn.com/S0301421508003042/1-s2.0-S0301421508003042-main.pdf?tid=8ed38a80-f985-11e4-817c-00000aab0f26&acdnat=1431531455\\_1d94cfb19b22387f88eb2db6ce374fd9](http://ac.els-cdn.com/S0301421508003042/1-s2.0-S0301421508003042-main.pdf?tid=8ed38a80-f985-11e4-817c-00000aab0f26&acdnat=1431531455_1d94cfb19b22387f88eb2db6ce374fd9) , дата обращения - 29.03.2019.
62. Solar Energy Perspectives. International Energy Agency [Электронный ресурс] URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar\\_Energy\\_Perspectives2011.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives2011.pdf) , дата обращения 29.03.2019.
63. US EIA [Электронный ресурс] URL: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=37&aid=12&cid=regions&syid=2000&eyid=2012&unit=BKWH> дата обращения 29.03.2019.