



2022
№2(14)

Окружающая среда и энергосбережение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703
(Online)

Окружающая среда и энерговедение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2022 №2(14)

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой журнал
Scientific, educational, cultural and educational network Journal

Основан в 2018 году,
1-й номер вышел в январе 2019 г.
Выходит четыре раза в год
при научно-информационной поддержке
Географического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова.

Founded in 2018,
The 1st issue was released in January 2019.
Published four times a year with scientific and
information support
Geographical faculty of Lomonosov Moscow
State University.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77 - 74521 от 7 декабря 2018 г.

Индексируется в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», Public Knowledge Project, Open Archives Initiative, OpenAIRE



Главный редактор

Залиханов Михаил Чоккаевич, д.г.н., профессор,
академик РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Зам. главного редактора

Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н
(МГУ им. М. В. Ломоносова)

Бушуев Виталий Васильевич, д.т.н., профессор (ОИВТ
РАН)

Ответственный секретарь

Соловьев Дмитрий Александрович, к.физ.-мат.н.
(ИО РАН).

Редакционная коллегия:

Безруких Павел Павлович, д.т.н., академик-секретарь РИА
(МЭИ)

Березкин Михаил Юрьевич, к.геогр.н (МГУ им. М. В.
Ломоносова).

Бушуев Виталий Васильевич, д.т.н., профессор (ОИВТ РАН).

Гулев Сергей Константинович, д.ф.-м.н., профессор, член-
корреспондент РАН (ИО РАН).

Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н (МГУ им. М. В.
Ломоносова).

Добролюбов Сергей Анатольевич, д.геогр.н., профессор, член-
корреспондент РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Зайченко Виктор Михайлович, д.т.н., профессор (ОИВТ РАН).

Залиханов Алим Михайлович, к.геогр.н, (МГУ им. М. В.
Ломоносова).

Киселева Софья Валентиновна, к.физ.-мат. н. (МГУ им. М. В.
Ломоносова).

Красовская Татьяна Михайловна, д.геогр.н., профессор (МГУ
им. М. В. Ломоносова).

Моргунова Мария Олеговна, к.э.н. (KTH Royal Institute of
Technology, Sweden).

Нигматулин Роберт Искандрович, д.ф.-м.н., профессор,
академик РАН (ИО РАН).

Панченко Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент (Российский
университет транспорта (МИИТ))

Показеев Константин Васильевич, д.физ.-мат.н., профессор
(МГУ им. М. В. Ломоносова).

Рафикова Юлия Юрьевна, к.геогр.н. (МГУ им. М.В.
Ломоносова)

Соловьев Дмитрий Александрович, к.физ.-мат.н.,
ответственный секретарь (ИО РАН).

Тихунов Владимир Сергеевич, д.геогр.н., профессор (МГУ им.
М. В. Ломоносова).

Адрес редакции:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, к. 19, НИЛ
возобновляемых источников энергии географического
факультета МГУ им. М.В.Ломоносова
Тел./ факс +7 (499) 939-42-57
e-mail: info@jeees.ru

Официальный сайт журнала <http://jeees.ru>

Окружающая

среда и энерговедение. 2022 №2(14)

Научный, образовательный, культурно-просветительский
сетевой журнал (периодическое сетевое издание)

Редактор К.С.Дегтярев

Корректор К.Г.Горошкин

Верстка М.Ю.Березкин

Перевод на английский язык

К.С.Дегтярев

Подписан в свет 01.07.2022.

Издатель:

Закрытое акционерное общество "Глобализация и
устойчивое развитие. Институт энергетической стратегии"
125009, г. Москва, Дегтярный переулок, д. 9, офис 011.

Тел./факс: +7 (495) 229-4241 доб. 224.

E-mail: guies@guies.ru.

Перепечатка или воспроизведение материалов
номера любым способом полностью или по частям
допускается только с письменного разрешения Издателя.

Учредитель: Соловьев Д.А.

© Редакция журнала

«Окружающая среда и энерговедение», 2020

Государственный Рубрикатор НТИ России
(ГРНТИ): 37; 39; 44; 45

Содержание

М.Ю.Березкин, О.А.Синюгин

**Особенности развития и меры поддержки возобновляемых
источников энергии в Японии и США 4**

В.А.Бутузов, Д.А.Будников

**Научные кадры высшей квалификации по возобновляемой
энергетике в 2000-2021 гг.: аспирантуры, диссертационные
советы, руководители18**

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

**Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной
экономике в России к 2060 году29**

С.А.Мысленков, С.В.Киселева

Анализ волновой энергии в Каспийском море40

Ю.Ю.Рафикова, Т.И.Андреевко

Геоинформационные системы в биоэнергетике51

В.М.Федоров, Д.М.Фролов

**Особенности изменения меридионального градиента
инсоляции в современную эпоху61**

К.В.Чекарев, А.М.Залиханов

**Парусная энергетическая установка наземного базирования
.....77**

Content

M. Berezkin, O.Sinyugin

**Features of development and support measures for renewable
energy sources in Japan and the USA 4**

V.Butuzov, D.Budnikov

**Highly qualified scientific personnel in renewable energy in 2000-
2021: postgraduate studies, dissertation councils, scientific
supervisors18**

K.Degtyarev, O.Sinyugin, M.Berezkin

**Estimations of the Investment Costs for Transition to Carbon-Free
Economy in Russia by 206029**

S.Myslenkov, S. Kiseleva

The Wave Energy Flux Analysis in the Caspian Sea40

J.Rafikova, T.Andreenko

Geoinformation systems in bioenergy51

V.Fedorov, D.Frolov

**Peculiarities of changes in the meridional gradient of insolation in
the modern era61**

K.Chekarev, A.Zalichanov

Land-based Sailing Power Plant77

Особенности развития и меры поддержки возобновляемых источников энергии в Японии и США

Берёзкин Михаил Юрьевич ^[0000-0002-6945-2131]^{1,2},

Синюгин Олег Анатольевич ^[0000-0001-5874-4342]^{1,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail: mberezkin@inbox.ru,

³E-mail: olegsinyugin@yahoo.com

Аннотация. В США многие частные энергетические компании внедряют программы по сокращению выбросов парниковых газов, такие как использование возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности. Они нацелены на решение социальных проблем через бизнес, связывая общественно важные проблемы с их собственными практиками, такими как корпоративная философия, бизнес-стратегии и экологический менеджмент. В Японии в последние годы компании сосредоточились на закупке необходимой электроэнергии с нулевым уровнем выбросов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), – это в дополнение к мерам энергосбережения и повышению энергоэффективности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, Япония, США.

1 Введение

В связи с заметным снижением затрат на производство электроэнергии, связанных с возобновляемой энергией во всем мире, американские компании запускают крупные проекты по строительству и инвестированию в ветровые и солнечные электростанции. Например, калифорнийские частные компании, связанные с информационными технологиями (ИТ), такие как Apple, Google, Amazon и Facebook, поставили цель на 100% потреблять электроэнергию, вырабатываемую за счет возобновляемых источников энергии. И, к примеру, компании Apple и Google, уже достигли этой цели к апрелю 2018 г.

Компания Apple по капитализации занимает первое место в мире с 886,5 млрд долл., а Google занимает второе место в мире с 718 млрд долл. По сравнению с японскими компаниями, экономический масштаб двух ведущих компаний США примерно в 3-4 раза выше. Филиалы Apple в Японии, а также здания головных

офисов и исследовательские объекты потребляют на 100% возобновляемую энергию. Кроме того, электрическая энергия, потребляемая в процессе производства японскими поставщиками запчастей для производства iPhone на 100% получена из возобновляемых источников. Таким образом, компания применяет свой подход во всем мире.

Японские частные компании также предпринимают меры по сокращению выбросов парниковых газов. Фактически, действия по внедрению возобновляемой энергии начались с момента запуска подключения «Зеленого тарифа» (Feed-in tariff – FIT) в 2012 г. Даже сейчас, по стоимости, возобновляемая энергия зависит от дотаций на зеленые тарифы и все еще является экономически нерентабельной. Кроме того, Япония сильно отличается от США, которые находятся в более благоприятном положении. В Японии нет таких крупных частных компаний с огромными финансовыми ресурсами, как Apple и Google. Существуют несколько средних частных компаний, которые вкладывают в строительство крупных ветровых и солнечных электростанций. В Японии можно отметить порядка 1000 частных компаний, стремящихся к достижению результатов в области энергосбережения и энергоснабжения с нулевым уровнем выбросов. Важно установить достижимые и реалистичные цели, не обязательно сужающиеся для сокращения выбросов только за счет возобновляемых источников энергии.

В США в 2020 г. возобновлена реализация Национального плана по сокращению выбросов парниковых газов к 2025 г. на 26–28% по сравнению с выбросами в 2005 г. Хотя сам этот план не имел юридической обязательной силы, в нем были положения, касающиеся сокращения выбросов CO₂ внутри страны, внедрения возобновляемых источников энергии, повышения энергоэффективности и сотрудничества в целях противодействия изменениям климата. Мы используем материалы Министерства энергетики США, Агентства по охране окружающей среды, Федеральной комиссии по регулированию энергетики США, Управления энергетической информации США и Климатической группы [1-6].

Япония поставила среднесрочную цель сократить выбросы на 26% по сравнению с 2013 г. к 2030 г., которая была представлена Организации Объединенных Наций при ратификации Парижского соглашения. Кроме того, Япония поставила долгосрочную цель «сократить выбросы парниковых газов до нуля к 2050 г. на основе национального плана действий (Nationally determined contribution – NDC).

2 Государственная экологическая и энергетическая политика США

На уровне правительств штатов был создан Климатический Альянс, хотя этот союз не является юридически обязательным [2]. По состоянию на 2019 г. 14 штатов и Пуэрто-Рико поставили цель достичь сокращения выбросы парниковых газов к 2025 г. на 26–28% по сравнению с выбросами в 2005. Численность населения этих штатов и регионов составляет 36% от общей численности населения в США.

В США также принят Стандарт внедрения возобновляемых источников энергии (RenewablePortfolioStandard – RPS), который требует, чтобы все электрические компании или розничные государственные электрические компании поставляли определенную долю электроэнергии из возобновляемых источников энергии. По состоянию на 2019 г. система стандартов внедрения ВИЭ используется в 29 штатах из 50 штатов и в Вашингтоне, округ Колумбия. Среди них самые густонаселенные – штат Калифорния и штат Нью-Йорк поставили высокую цель достижения соотношения возобновляемых источников энергии до 50% от общего к 2030.

Система RPS законодательно закреплена на государственном уровне. В 2019 г. штаты, которые реализуют стандарты внедрения ВИЭ, контролируют 56% от общего объема розничной продажи электроэнергии в США. В 8 штатах также установлены не имеющие обязательной юридической силы цели по внедрению ВИЭ. Правительства штатов контролируют объем внедрения, но определение закупочная и т. д. осуществляется через рынок. В США возобновляемая энергия мощностью 57 ГВт была введена в рамках RPS между 2000 и 2015 гг. Среди них, ежегодный ввод мощностей на энергии ветра занимал первое место, на их долю приходилось 64% от общего. С 2010 г. внедрение солнечной энергии постепенно расширяется, выходя на первый план в 2015 г. – на его долю ежегодно приходится порядка 70% прироста мощностей на ВИЭ.

2.1 Перспективы снижения выбросов парниковых газов на федеральном уровне

В США существует федеральный план по сокращению выбросов парниковых газов, но нет четкой цели для политики в отношении структуры энергопотребления, несмотря на то что Министерство энергетики США делает ежегодные энергетические прогнозы, и на их основе определяет перспективы будущей структуры энергодобавки [4].

В США, хотя политика в области окружающей среды и энергетики формулируется на федеральном уровне, в отношении рынка электроэнергии осуществляется в основном правительствами штатов. В результате реализация политики на уровне штата приводит к формированию энергодобавки на федеральном уровне. В последние годы многие частные компании активизируют свои усилия по сокращению выбросов парниковых газов, таких как закупки, инвестиции в энергосбережение и возобновляемые источники энергии [7].

Так, например, инвестиционный налоговый кредит (InvestmentTaxCredit – ИТС) и производственный налоговый кредит (ProductionTaxCredit – ПТС) применяются как меры, способствующие использованию возобновляемых источников энергии даже на федеральном уровне. Частные лица и компании, внедряющие возобновляемую энергию, могут снижать подоходный налог или получать корпоративные налоговые вычеты. Производственный налоговый кредит, который вычитается в зависимости от количества произведенной электроэнергии, был введен в действие в качестве временного законодательства в 1992 г., но он все

еще действует в настоящее время. Он предназначен для стимулирования использования энергии ветра [8]. Срок действия налога истек в 2019 г., ставка вычета составляла 30%, она была снижена до 26% в 2020 г. и до 22% в 2021 г. После 2022 г. его планируется установить на уровне 10% [9].

2.2 Ситуация в штатах Калифорния и Нью-Йорк

Ситуация в США различается в штатах, которые придают большое значение природоохранным усилиям, и в штатах, которые этого не делают. В качестве примеров первого подхода можно привести штат Калифорния и штат Нью-Йорк, которые работают над достижением установленных целей, и являются наиболее продвинутыми штатами в США, в которых меры противодействия изменению климата лежат в основе энергетической политики.

В 2006 г. штат Калифорния впервые в США принял закон о правилах по выбросу парниковых газов и поставил цель сократить выбросы в 2020 г. до уровня 1990 г. После этого срок был отодвинут с 2020 до 2030 г. и была заявлена новая цель сокращения выбросов – на 40% по сравнению с уровнем 1990 г. [10].

Что касается RPS, созданной в 2015 г., то согласно ему доля возобновляемых источников энергии в объеме розничной торговли штата должна составить 33% к 2020 г. и 50% к 2030 г. Фактический результат в конце 2019 г. был достигнут на уровне 27%.

В 2014 г. штат Нью-Йорк сформулировал программу «Реформирования энергетической повестки» (Reforming the Energy Vision – REV). Поставлена цель сократить выбросы парниковых газов на 40% по сравнению с уровнями 1990 г. к 2030 г. и на 80% по сравнению с уровнями 1990 г. к 2050 г.

В соответствии со стандартом чистой энергии, основанным на REV, штат решил увеличить долю возобновляемой энергии в розничном потреблении электроэнергии штата до 50% к 2030 г. Электростанции могут получать «кредита с нулевым выбросом» (ZEC) в течение 12 лет с 2017 г. по 2029 г. Годовой объем закупок ZEC установлен на уровне 27,6 млн. МВтч. По выбросам CO₂ в электроэнергетике в 2030 г. показатель будет достигнут снижения достигнет 48,7% по сравнению с уровнем 2005 г. [11].

3 Новые направления энергетической политики Японии

В Японии темпы внедрения возобновляемой энергии быстро увеличились благодаря системе закупки излишков солнечной электроэнергии и системе стимулирующих ВИЭ зеленых тарифов, введенной в 2012 г. Объем неископаемой энергии составляет порядка 50 млрд. кВт-ч в год [12]. Доля выработки возобновляемой энергии в общем объеме электроэнергии в Японии на конец 2020 г. составляла 19,3%. Развитие возобновляемой энергии происходит в основном за счет солнечной энергии, а использование других источников возобновляемой энергии еще не достигло больших успехов.

Большинство компаний, производящих возобновляемую энергию, работают на основе зеленых тарифов. Вырабатываемая электроэнергия покупается региональными компаниями по передаче и распределению электроэнергии стабильно по фиксированной цене.

Когда японские частные компании стремятся достичь цели 100% использования возобновляемой энергии они выбирают одно из следующих средств:

- производство возобновляемой энергии для покрытия своего собственного потребления;
- двустороннее соглашение с розничной электрической компанией, которая предоставляет контракт на поставки возобновляемой энергии (без применения зеленых тарифов);
- закупка по зеленым тарифам у внешних поставщиков.

4 Практика внедрения возобновляемых источников энергии частными компаниями в США

IT-компании, такие крупные как Apple и Google, оказывают сильное влияние на окружающую среду, поскольку они потребляют большое количество электроэнергии на своих собственных объектах, таких как центры обработки данных. По этой причине они работают над повышением эффективности потребления и экономии энергии на ранней стадии. В дополнение к этим мерам Apple стремилась использовать возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая и геотермальная энергия, для всех своих офисов и магазинов в 43 странах мира.

С 2012 г., по мере того, как объем потребления электроэнергии увеличивается с каждым годом, IT-компания одновременно работают над увеличением объемов закупок возобновляемой энергии. В 2020 г. доля возобновляемых источников энергии в энергопотреблении увеличилась до 97%. Компания Apple сообщила, что, приобретая и используя возобновляемую энергию, она с 2011 г. сократила выбросы парниковых газов на своих собственных предприятиях по всему миру на 54% и избежала выбросов примерно на 2,1 миллиона тонн CO₂. Они сократили выбросы примерно на 600 тыс. т в одном только 2020 г.

В США частными компаниями используются следующие средства по снижению выбросов:

- внедрение производства возобновляемой энергии для собственного электропотребления;
- покупка электроэнергии по плану «Зеленая энергия» у местной энергетической компании;
- закупка электроэнергии путем заключения долгосрочного соглашения о покупке электроэнергии с производителями энергии из возобновляемых источников;
- закупка экологических контрактов (REC) извне.

Компания Apple сконцентрировалась на строительстве собственных объектов по производству возобновляемой энергии в районе, где расположена база компании, и на прямых поставках электроэнергии. По состоянию на начало 2020 г. они приобрели около 76% от общего объема возобновляемой энергии на своих собственных объектах по производству возобновляемой энергии.

По состоянию на 2020 г. компания Apple внедрила 25 объектов возобновляемой энергетики (общая мощность 626 МВт), а еще 15 проектов (общая мощность 775 МВт) находились на стадии строительства.

С 2010 г. компания Google инвестировала около 2,5 млрд. долл. в производство возобновляемой энергии. Компания Google заключила долгосрочные соглашения со многими компаниями по производству энергии из возобновляемых источников в США, Южной Америке и Европе. Всего 19 контрактов по ветро- и солнечным электростанциям (общая мощность 2,6 ГВт).

Так как возобновляемая энергия, приобретаемая Google, переменна в течение суток и года, возникает разрыв во времени и месте между спросом и предложением. Поэтому компания Google работает над внедрением различных способов хранения и аккумуляции энергии.

5 Практика внедрения возобновляемых источников энергии частными компаниями в Японии

Усилия японских частных компаний по снижению выбросов углерода часто связаны с энергосбережением. Что касается возобновляемых источников энергии, то их не так много по сравнению с компаниями в Европе и США. Однако в последние годы частные компании в Японии все чаще внедряют установки по производству возобновляемой энергии на своих заводах и в магазинах для собственного потребления.

Компания SekisuiHouse в 2008 г. объявила «Декларацию о декарбонизации: видение 2050 г.», а в 2015 г. подписала «Совместную декларацию в секторе строительства» по соблюдению Парижского соглашения. По потреблению электроэнергии и доле возобновляемой энергии SekisuiHouse ставит следующие цели, чтобы покрыть потребляемую электроэнергию возобновляемыми источниками энергии:

- Среднесрочная цель: доля в 20% возобновляемой энергии к 2030 г.
- Конечная цель: покрытие 100% возобновляемой энергией к 2040 г.

Общее потребление электроэнергии компании в 2019 г. составляло 120 533 МВтч. SekisuiHouse также способствует сокращению потребления за счет энергосбережения. Что касается возобновляемых источников энергии, то на пяти ее заводах установлены крупные солнечные электростанции общей мощностью 6,7 МВт [13].

SekisuiHouse участвует в проекте по установке солнечных панелей во время строительства и реконструкции домов. Годовая установленная мощность по солнечной энергии в 2018 г. составляла 86,2 МВт. Достигнута высокая доля

установки солнечных электростанций при строительстве новых домов – 79,8%. Установленная мощность по солнечной энергии в домах превышает 650 МВт.

В сфере жилищного строительства SekisuiHouse является пионером в строительстве низкоуглеродных домов, которые значительно сокращают потребление энергии благодаря высокой теплоизоляции и энергосберегающим характеристикам. В 2009 г. SekisuiHouse начал продвижение экологически чистого жилья «GreenFirst», а в 2013 г. – «GreenFirstZero» – это дом, целью которого является достижение положительного баланса годового потребления первичной энергии (кондиционирование воздуха, горячее водоснабжение, освещение, вентиляция) за счет повышения теплоизоляции и энергосбережения в доме, а также за счет выработки энергии с помощью солнечных панелей и топливных элементов.

Японская компания AEON поставила цель к 2050 г. свести к нулю выбросы парниковых газов за счет внедрения. Объем электроэнергии, потребляемой AEON, в 2020 г. составлял около 7,4 млрд. кВтч. AEON планирует сократить потребление электроэнергии за счет энергосбережения во всех магазинах, установить солнечные панели и увеличить объем закупок возобновляемой энергии. В 2022 г. AEON планирует ввести около 200 тыс. кВт объектов возобновляемой энергетики, в основном солнечной. В дополнение к активному внедрению собственной солнечной генерации, магазины AEON Group также покупают электроэнергию, полученную из возобновляемых источников энергии в том же районе, где расположены магазины.

В целях сокращения общего потребления электроэнергии AEON содействует развитию магазина SmartAEON следующего поколения. Они внедряют интеллектуальные технологии, сочетающие энергосбережение и возобновляемую энергию. Цель состоит в том, чтобы перейти от простой оптимизации использования энергии к активному применению возобновляемых источников энергии, вырабатываемых в регионе. Кроме того, группа компаний AEON объявила, что в 2022 г. будет активно внедрять электромобили [14].

6 Сравнительный анализ ситуации с возобновляемой энергией в Японии и США

Основными источниками возобновляемой энергии и в Японии, и в США являются ветро- и солнечная энергетика. В конце 2020 г. по установленной мощности ветроэлектростанций США была второй в мире (после Китая) – примерно 95 ГВт, в Японии около 30 ГВт. Причина, по которой ветровая энергетика в Японии слабо развита по сравнению с США, заключается в том, что разница между стоимостью производства электроэнергии данного типа в Японии и США составляет примерно 2,5 раза.

Барьеры в развитии ветроэнергетики в Японии являются следующие:

- мало равнинных площадей, на которых могут быть расположены ветроустановки;
- высокие капитальные затраты и эксплуатационные расходы на обслуживание;

- стабильная система выработки электроэнергии на ветроустановках и система технического обслуживания не созданы, что приводит к высокой стоимости выработки электроэнергии;
- высокие риски для генерирующих энергокомпаний.

Поскольку площади с хорошими условиями по ветру ограничены, а среднегодовая скорость ветра мала, показатель Киум в Японии составляет 22%, что значительно ниже, чем в США (31%).

Площади со скоростью ветра 6,5 м/с или более составляют всего около 10% всей страны. Среднегодовой коэффициент загрузки электростанций в северной части Японии составляет 29%, что выше, чем в среднем по стране (23%), поэтому ветряные электростанции сосредоточены в регионах Хоккайдо и Тохоку с хорошими ветровыми условиями. С другой стороны, поскольку системы электросетей в этих районах не очень развиты, возникает много системных проблем, таких как стоимость подключения и ограничение пропускной способности. Поэтому предпринимаются различные контрмеры, такие как модернизация системы электропередач.

В США существует множество подходящих районов со скоростью ветра более 7,0 м/с, главным образом в центральном регионе, таком как штат Техас. Крупномасштабные ветровые электростанции широко распространены. Средний коэффициент загрузки (использования установленной мощности) составляет от 25 до 40%, что очень высоко по сравнению с Японией.

Условия для бизнеса в ветроэнергетике в Японии невыгодно отличаются от США, поэтому японские генерирующие компании не решаются инвестировать. Даже, если правительство устанавливает и гарантирует высокую закупочную цену в рамках системы FIT, для генерирующих компаний трудно получать прибыль и стабильно покрывать затраты. Таким образом, в Японии производство энергии ветра все еще не является конкурентоспособным источником энергии.

По состоянию на конец 2020 г. установленная мощность по выработке *солнечной энергии* в Японии была около 45 ГВт, а США – около 60 ГВт. Япония занимает передовые места в мире по внедрению солнечной энергии. Районы с хорошими климатическими условиями, с уровнями солнечной радиации от 6,5 до 7,0 кВт/кв.м/сутки распространены в США по всей стране, в основном в штате Калифорния и других южных штатах. В Японии в основном уровень солнечной радиации составляет от 3,5 до 5,5 кВт/кв.м/сутки. Места с уровнем выше 5,5 кВт/кв.м/сутки ограничены частью островов Кюсю и Сикоку. В результате средний коэффициент загрузки солнечных установок в Японии ниже, чем в США.

В Японии стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии все еще высока, и еще не достаточно конкурентоспособна. По этой причине объем возобновляемой энергии, закупаемой частными компаниями не растет быстро, за исключением некоторых агрессивных игроков. С другой стороны, в США по мере того, как растет конкурентоспособность производства возобновляемой энергии, не только электроэнергетические, но и частные компании значительно увеличили объем закупок возобновляемой энергии. В штатах, где

внедряется система RPS, электрические компании обязаны закупать определенный процент возобновляемой энергии.

В США производство возобновляемой энергии, такой как энергия ветра и солнечная энергия, становится конкурентоспособным по стоимости по сравнению с существующими источниками выработки электроэнергии, такими как энергия угля и газа. В частности, затраты на производство энергии ветра имеют тенденцию к дальнейшему снижению из-за преимуществ технологий, приводящих к более высокому коэффициенту нагрузки установки, таких как более крупные и менее материалоемкие турбины.

В основном стоимость энергии ВИЭ состоит из постоянных расходов, где амортизация происходит каждый год, поэтому ожидается, что тенденция снижения затрат будет продолжаться в течение длительного периода времени.

С другой стороны, согласно энергетическому прогнозу EIA [7], предполагается, что цены на природный газ, которые снижались в последние годы, в 2022 г. выросли и в долгосрочной перспективе будут иметь тенденцию к росту. Это следует учитывать при рассмотрении вопроса об инвестициях в строительство новой электростанции, а также будущие экологические нормы. Кроме того, поскольку частные компании (крупные потребители электроэнергии), такие как Apple и Google, расценивают стоимость энергопотребления центров обработки данных как самый большой фактор затрат, они выбирают электроэнергию ВИЭ как долгосрочный и стабильный способ избежать риска колебаний цен на электроэнергию.

Конечно, энергия ветра и солнечная энергия являются переменными источниками питания, мощность которых зависит от природных условий, и не может быть одинаково сопоставима со стабильными источниками питания, такими как газовая электростанция, которая обладает превосходными характеристиками нагрузки, контроля частоты и напряжения, техническое обслуживание.

Однако, когда стоимость выработки возобновляемой энергии снижается и становится конкурентоспособной на уровне, не зависящем от системы FIT, в Японии также существует вероятность того, что долгосрочные контракты на введения новых мощностей на основе ВИЭ станут более востребованными в будущем.

С тех пор, как зеленые тарифы в Японии начала функционировать в середине 2012 г., мощность объектов по производству возобновляемой энергии, в основном солнечной, увеличилась примерно на 60% по сравнению с базовым 2012 г. Соотношение возобновляемой энергии (включая гидроэлектроэнергию) к общему объему выработки электроэнергии в Японии постепенно увеличивалось с уровня 10% в 2010 г., до 16% в 2018 г. Большая часть увеличения мощности обусловлена производством солнечной энергии для коммерческого использования, а совокупная установленная мощность с момента запуска зеленых тарифов составляет около 27 ГВт. Если посмотреть на соотношение выработки возобновляемой энергии к общей выработке электроэнергии, то доля биомассы была самой большой до 2014 г., но после внедрения зеленых тарифов выработка солнечной энергии быстро росла, достигнув максимальной доли в 45% в 2018 г.

В США производство ветровой энергии является крупнейшим среди возобновляемых источников энергии, на его долю приходилось около 8% общего

производства электроэнергии, включая атомную и тепловую энергию, по состоянию на 2018 г. Производство солнечной энергии также продолжало расти в последние годы, установленная мощность в 2018 г. примерно в пять раз больше, чем в 2010 г.

Зеленые тарифы, которые начали применяться в Японии с 2012 г., и система стандартов внедрения ВИЭ (RPS), используемые в различных штатах США с 2000 г., способствовали развитию возобновляемых источников энергии. Система зеленых тарифов устанавливает более высокую цену на электроэнергию, чем обычно для генерации возобновляемой энергии, и обязывает местные электроэнергетические компании покупать ее в сети. Закупочная цена на возобновляемую энергию характеризуется тем, что она определяется на основе спроса и предложения на рынке производства возобновляемой энергии. В обоих случаях электроэнергетическая компания покупает электроэнергию, произведенную из возобновляемых источников. При продаже электроэнергии пользователям затраты переносятся на розничную цену, что существенно влияет на рост тарифов.

Хотя распространение возобновляемой энергии постепенно прогрессировало, ее доля к общему производству электроэнергии составляло всего 1% в 2010 г., то есть через семь лет после запуска системы. Из-за низкой эффективности системы RPS встал вопрос о внедрении системы FIT, которая определяла соответствующую цену покупки для каждого источника энергии в отдельности и гарантировала покупку в течение длительного периода времени. После запуска системы FIT в середине 2012 г. было принято решение о поэтапном отказе от системы RPS в течение пяти лет начиная с 2017 г.

В Японии с момента запуска системы зеленых тарифов цена покупки электроэнергетическими компаниями, представляет собой тариф, в котором все пользователи платят за возобновляемую энергию как часть розничной цены на электроэнергию. Плата за продвижение производства возобновляемой энергии взимается с каждого пользователя пропорционально количеству использованной электроэнергии.

Между тем, в США электрические компании закупают возобновляемую энергию через долгосрочные контракты и текущие рыночные сделки для выполнения возложенных обязательств. В отличие от Японии стоимость закупок возобновляемых источников энергии добавляется в качестве сбора, и это не является прямым бременем для пользователей. Однако, поскольку дополнительная стоимость в конечном итоге добавляется к розничной цене на электроэнергию, это приводит к косвенной нагрузке на потребителя.

Согласно данным по штатам США, с 2013 г. стоимость закупок для выполнения обязательств, распределенных системой RPS в штате Нью-Йорк, находится на уровне от 1,1% до 1,4% от цены электроэнергии. С другой стороны, закупочная стоимость по RPS в штате Калифорния была на более высоком уровне – от 7,5 до 11,9% от цены на электроэнергию.

В штате Калифорния уровень цен на электроэнергию продолжает расти и доля возобновляемых источников энергии в балансе увеличивается, так что влияние становится более заметным.

7 Выводы

Представлен сравнительный анализ ситуации с возобновляемой энергией в Японии и США на примере энергии ветра и солнечной энергии, в частности, на примере частных американских компаний Apple и Google и японских Sekisui House и AEON, IT-компании из Калифорнии, к 2021 г. уже достигли цели покрытия 100% потребляемой электроэнергии возобновляемыми источниками. Еще несколько лет назад, хотя все признавали преимущество возобновляемых источников энергии по снижению выбросов парниковых газов, частные компании не могли приступить к разработке и приобретению ВИЭ из-за высокой стоимости генерации. Правительство должно было сделать обязательными закупки для электрогенерирующих компаний, чтобы способствовать внедрению ВИЭ, также было необходимо снизить затраты на производство электроэнергии за счет финансовой поддержки, такой как налоговые вычеты.

В США системой RPS охвачено 29 штатов и Вашингтон, округ Колумбия. Она обязывает электроэнергетические компании приобретать определенный процент возобновляемой энергии. В Японии – система FIT обязывает электроэнергетические компании покупать возобновляемую энергию за определенный период по цене, установленной правительством. Правительства обеих стран политически стимулировали и способствовали внедрению возобновляемой энергии.

Штат Калифорния поставил амбициозную цель сократить выбросы парниковых газов на 40% по сравнению с уровнями 1990 г. к 2030 г., а также установил долю возобновляемых источников энергии в 50% от количества электроэнергии, продаваемой в штате к 2030 г., на основе системы RPS.

Стоимость возобновляемой энергии (стоимость выполнения обязательства системы RPS) в цене на электроэнергию составляла около 12% в 2020 г., а средняя розничная цена на электроэнергию также стала примерно в 1,5 раза выше, чем в среднем по США. Тем не менее, тот факт, что существует много резидентов и частных компаний, которые платят премию за возобновляемую энергию, является одним из факторов, поддерживающих такие рынки.

Растет число частных компаний,купающих возобновляемую энергию путем прямого заключения долгосрочных соглашений о разделе продукции с компаниями, производящими возобновляемую энергию. Это зависит от состояния цен на топливо, но оно становится сопоставимым с выработкой электроэнергии на газе из-за недавнего снижения стоимости производства возобновляемой энергии.

В частности, компании Apple и Google планируют и далее содействовать усилиям по созданию проекта по производству возобновляемой энергии в качестве средства защиты от колебаний цен на топливо и цены на электроэнергию.

В Японии стоимость производства возобновляемой энергии еще не настолько уменьшилась, чтобы частные компании могли самостоятельно закупать и использовать ВИЭ без системы FIT.

Экономический масштаб частных компаний в Японии также мал по сравнению с ведущими глобальными компаниями, такими как Apple и Google. Условия

размещения ветровой и солнечной энергии в Японии не являются благоприятными, но средняя загрузка станций находится на низком уровне в настоящее время.

Поскольку ВИЭ являются источниками питания с переменной выработкой, в значительной степени зависящей от погоды, необходимо также учитывать системные ограничения в их работе и управлении. Нужно внедрять системы аккумулирования, способные справиться с переменным энергоснабжением.

Для Японии важен путь объединения ВИЭ с другими источниками энергии с нулевым уровнем выбросов (неископаемых источников энергии), таких как большие гидроэлектростанции и ядерная энергия, и источников тепловой энергии, необходимых для стабильной работы системы электросети.

Недавно в Японии к программе RE 100 начали присоединяться и крупные частные компании, такие как SekisuiHouse и AEON. Они поставили перед собой цели, которые связаны с их бизнесом и прикладывают усилия по сокращению выбросов парниковых газов. В Японии частные компании, которые стремятся к достижению этой цели, будут включать в свою бизнес-повестку энергосбережение, использование источников энергии с нулевым уровнем выбросов и ВИЭ.

Для достижения национальной цели по сокращению выбросов парниковых газов в Японии доля выработки из источников энергии с нулевыми выбросами (возобновляемых источников энергии, гидроэлектроэнергии, ядерной энергии) должна быть увеличена до 54% в 2030 г. Однако с точки зрения реальной выработки возобновляемых источников энергии, исключая большие гидроэлектростанции, на конец 2020 г. достигнуто лишь 12%, поэтому заявленная цель трудно достижима лишь с помощью ВИЭ. В дополнение к внедрению возобновляемой энергии необходимо комплексно использовать ядерную энергию и повышать эффективность выработки тепловой энергии.

Статья подготовлена в соответствии с госбюджетной темой «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» (121051400082-4).

Литература

1. The Climate Group. URL: <https://www.theclimategroup.org>, reference date: 10.06.2022
2. U.S. Climate Alliance, 2019. URL: <http://www.usclimatealliance.org/annual-report>, reference date: 10.06.2022
3. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov>, reference date: 10.06.2022
4. U.S. Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov>, reference date: 10.06.2022
5. U.S. Federal Energy Regulatory Commission. URL: <https://www.federalregister.gov/agencies/federal-energy-regulatory-commission>, reference date: 10.06.2022
6. U.S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov>, reference date: 10.06.2022

7. EIA «Annual Energy Outlook 2020». URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>, reference date: 10.06.2022.
8. Ministry' of the Environment. URL: <https://www.state.gov/environment>, reference date: 10.06.2022
9. Natural Energy Foundation. URL: <https://www.ef.org/>, reference date: 10.06.2022
10. California Public Utilities Commission «California Renewables Portfolio Standard», 2019. URL: <http://large.stanford.edu/courses/2020/ph240/multani1/docs/puc-2019.pdf>
11. Electric Power Annual, 2020. URL: <https://www.eia.gov/electricity/annual/pdf/epa.pdf>, reference date: 10.06.2022
12. METI Agency for Natural Resources and Energy. URL: <https://www.enecho.meti.go.jp/en>, reference date: 10.06.2022
13. Sekisui House Co., Ltd. URL: <https://sekisuihouse-global.com>, reference date: 10.06.2022
14. AEON Co., Ltd. URL: https://www.aeon.info/en/sustainability/environment/ev_station, reference date: 10.06.2022

References

1. The Climate Group. URL: <https://www.theclimategroup.org>, reference date: 10.06.2022
2. U.S. Climate Alliance, 2019. URL: <http://www.usclimatealliance.org/annual-report>, reference date: 10.06.2022
3. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov>, reference date: 10.06.2022
4. U.S. Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov>, reference date: 10.06.2022
5. U.S. Federal Energy Regulatory Commission. URL: <https://www.federalregister.gov/agencies/federal-energy-regulatory-commission>, reference date: 10.06.2022
6. U.S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov>, reference date: 10.06.2022
7. EIA «Annual Energy Outlook 2020». URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>, reference date: 10.06.2022.
8. Ministry' of the Environment. URL: <https://www.state.gov/environment>, reference date: 10.06.2022
9. Natural Energy Foundation. URL: <https://www.ef.org/>, reference date: 10.06.2022
10. California Public Utilities Commission «California Renewables Portfolio Standard», 2019. URL: <http://large.stanford.edu/courses/2020/ph240/multani1/docs/puc-2019.pdf>
11. Electric Power Annual, 2020. URL: <https://www.eia.gov/electricity/annual/pdf/epa.pdf>, reference date: 10.06.2022
12. METI Agency for Natural Resources and Energy. URL: <https://www.enecho.meti.go.jp/en>, reference date: 10.06.2022
13. Sekisui House Co., Ltd. URL: <https://sekisuihouse-global.com>, reference date: 10.06.2022
14. AEON Co., Ltd. URL: https://www.aeon.info/en/sustainability/environment/ev_station, reference date: 10.06.2022

Features of development and support measures for renewable energy sources in Japan and the USA

Mikhail Berezkin^{1,2}, Oleg Sinyugin^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: mberezkin@inbox.ru,

³E-mail: olegsinyugin@yahoo.com

Abstract. In the US, many private energy companies are implementing programs to reduce greenhouse gas emissions, such as using renewable energy sources and improving energy efficiency. They aim to solve social problems through business by linking socially important issues to their own practices such as corporate philosophy, business strategies and environmental management. In Japan, in recent years, companies have focused on procuring needed zero-emission electricity from renewable energy sources (RES), in addition to efforts to improve energy conservation and energy efficiency.

Keywords: renewable energy sources, Japan, USA.

Acknowledgment

The article was prepared in accordance with the state budget theme "Geographical foundations of sustainable development of energy systems using renewable energy sources" (121051400082-4).

Научные кадры высшей квалификации по возобновляемой энергетике в 2000-2021 гг.: аспирантуры, диссертационные советы, руководители

Бутузов Виталий Анатольевич^{[0000-0003-2347-9715]1,3},

Будников Дмитрий Александрович^{[0000-0001-5874-4342]2,4}

¹ФГБОУ Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина

²ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

³E-mail: ets@nextmail.ru,

⁴E-mail: dimm13@inbox.ru

Аннотация. Представлены основные сведения об аспирантурах 7 технических вузов и одного научного учреждения, в которых в 2021 г. велась подготовка ученых по направлению 14.06.01 – Ядерная, тепловая, возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии со специализацией 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии. Всего в 2021 г. в них обучались 83 человека. Приведены результаты анализа защит 117 кандидатских диссертаций, подготовленными техническими вузами по ВЭ с 2000 по 2021 гг. с указанием ведущих по числу защит организаций, распределением по видам ВЭ в целом по всем организациям и по трем ведущим их них. Представлены данные 13 докторских диссертаций, защищенные в 1998-2021 гг. по техническим наукам по ВЭ с распределением их по тематике. Отмечено, что научный уровень диссертаций определяется личностью руководителя диссертаций. Приведен список 12 научных руководителей, подготовивших к защите трех и более аспирантов по ВЭ.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика (ВЭ), возобновляемые источники энергии (ВИЭ), электрогенерация, образовательные центры, аспирантуры, кандидатские, докторские диссертации, руководители диссертаций, диссертационные советы.

1 Введение

Электро- и теплогенерация на основе ВИЭ являются развивающимися направлениями российской энергетики. Ее установленная мощность в 2021 г. с учетом

гидроэнергетики, солнечной и ветровой энергетики составила – 53,95 ГВт (21,9%) от суммарной мощности ЕЭС РФ, а выработка электрической энергии – 21,5 ГВтч/год. В основе развития ВЭ достижения науки, для которой подготовка кадров, актуальна для нашей страны. В отличие от западных научных традиций в России принята двухступенчатая подготовка ученых: кандидатов и докторов наук. Основы такой работы, в том числе в области солнечной энергетики были заложены в тридцатых годах прошлого века в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского [1], сейчас Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИИ»), доктором наук профессором Валентином Алексеевичем Баумом (1904-1985), который подготовил к защите по гелиотехнике более ста кандидатов и докторов наук. До 2022 года защита диссертаций производилась в РФ по научной специальности 05.14.08 - Энергоустановки на основе ВИЭ возобновляемых видов энергии. Данные по аспирантурам учреждений, защитам кандидатских и докторских диссертаций в области наук по ВИЭ получены по материалам сайтов, а также по информации руководителей диссоветов: НИУ «МЭИ» [2] (председатель, д.т.н., профессор Тягунов М.Г.), учреждения «ВИМ» [3] (ученый секретарь д.т.н. Будников Д.А.), СПбПУ [4] (зам. председателя, д.т.н., профессор Елистратов В.В.); УРФУ [5] (председатель, д.т.н., профессор Щеклеин С.Е.); ЮУрГУ [6] (д.т.н., профессор Кирпичникова И.М.).

2 Аспирантуры в 2021 г.

В 2021 г. подготовка научных кадров по направлению 14.06.01 – Ядерная, тепловая, возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии, по специальности 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии осуществлялась в РФ в семи ВУЗах и одном научном учреждении:

1. ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт, г. Москва»;
2. ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", г. Санкт-Петербург;
3. ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Южно-Уральский государственный университет", г. Челябинск;
4. ФГАОУ ВО "Уральский Федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург»;
5. ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет";
6. ФГБОУ ВО "Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина";
7. ФГАОУ ВО "Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского";
8. ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр "ВИМ".

Четыре из них имели диссертационные советы по этой специальности: ФГБОУ ВО «МЭИ» (НИУ "МЭИ"), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), ФГАОУ ВО «Уральский федеральный

университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ), ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). В 2021 г. в указанных аспирантурах обучались 83 человека.

Наибольший в стране опыт с тридцатых годов XX века имеет аспирантура НИУ "МЭИ" при кафедре гидротехники и ВИЭ, возглавляемой к.т.н., доцентом Татьяной Александровной Шестопаловой. Диссертационный совет НИУ "МЭИ" по этой специальности возглавляет д.т.н. профессор Михаил Георгиевич Тягунов. В 2021 г. в данной аспирантуре по специальностям 05.14.08 и 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоавтоматы обучались 18 человек, в т.ч. 6 иностранцев. С семидесятых годов XX века готовит аспирантов по ВЭ крупнейший ВУЗ нашей страны – СПбПУ, где в НОЦ ВИЭ в 2021 г. по специальностям 05.14.08 и 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы обучались 6 аспирантов, в т.ч. 2 иностранца. Научный руководитель НОЦ ВИЭ известный ученый гидротехник академик, д.т.н., профессор Юрий Сергеевич Васильев, а директор д.т.н., профессор Виктор Васильевич Елистратов. В УрФУ инициатором ВЭ является заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» д.т.н., профессор Ирина Михайловна Кирпичникова, которая в аспирантуре по специальности 05.09.03 – Электрические комплексы и системы готовит специалистов, в т.ч. по использованию ВИЭ. В 2021 г. здесь обучались 16 человек. В аспирантуре УрФУ при кафедре «Атомные станции и ВИЭ» под руководством д.т.н., профессора Сергея Евгеньевича Щеклеина по специальности 05.14.08 в 2021 г. обучались 11 человек, в т.ч. 8 иностранцев. Диссертационный совет этого ВУЗа также возглавляемый С.Е. Щеклеиным ежегодно принимает 2-3 защиты кандидатских диссертаций. Подготовку научных кадров по специальности 05.14.08 в 2021 г. вели также ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ) и ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ", в котором работает диссертационный совет.

3 Диссертации в 2000-2021 гг.

В 2000-2021 гг. по возобновляемой энергетике были защищены 117 (100%) кандидатских диссертаций, в т.ч. по специальности 05.14.08 – 109 работ, 05.14.01- Энергетические системы и комплексы – 5 работ, 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы – 2 работы.

В 2011-2016 гг. было защищено 32 диссертации, а в 2017-2021 гг. только 20 от 2 до 6 работ в год. На рис. 1 представлено распределение диссертаций по диссоветам. Наибольшее их число имеет НИУ "МЭИ" – 41 (35%) диссертация. На втором месте ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – 35 (30%) диссертаций, а на третьем СПбПУ – 24 (20%) работ.

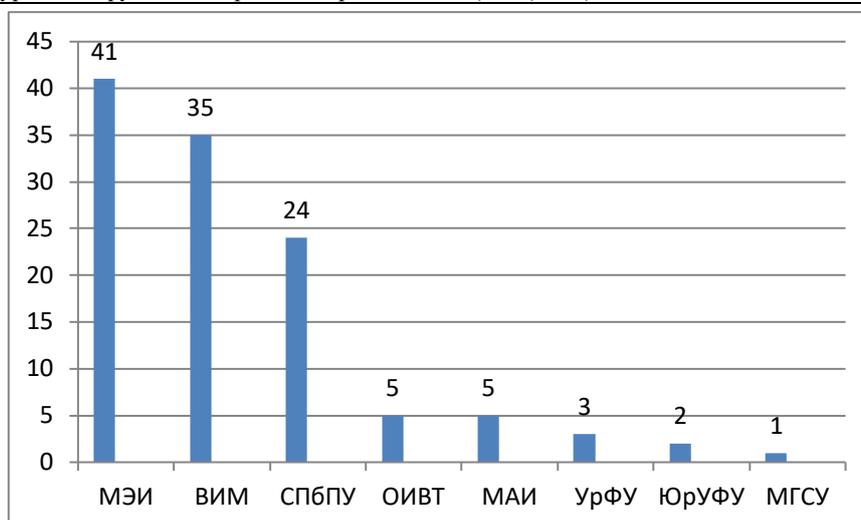


Рис. 1. Число кандидатских диссертаций в 2000 - 2021 гг. по диссоветам, всего 117 работ

Больше всего защищено работ по солнечной энергетике – 43. На втором месте работы по комплексному использованию ВИЭ – 25. На третьем и четвертом, соответственно, гидроэнергетика – 20 и ветроэнергетика – 17 (рис.2).

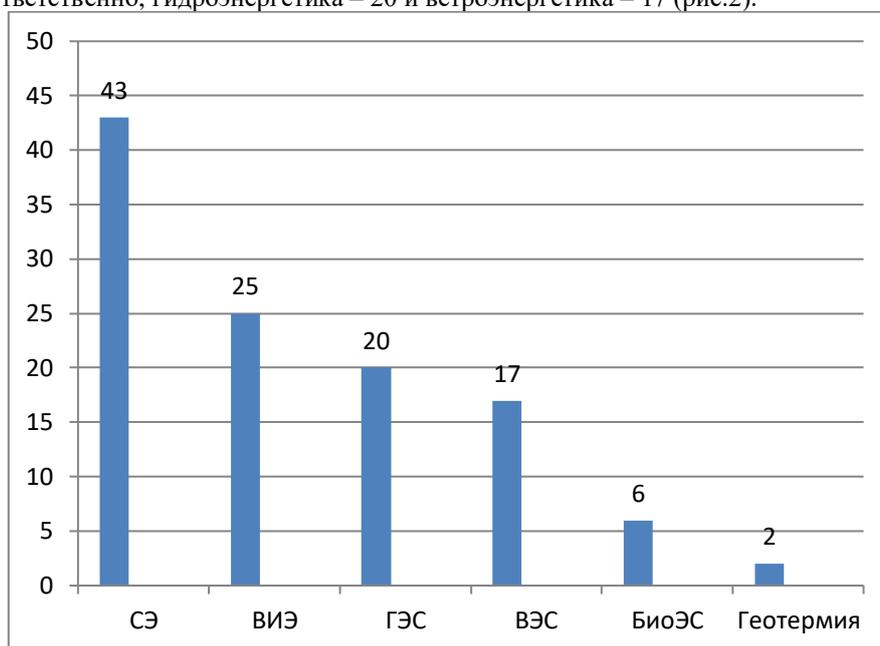


Рис. 2. Тематика кандидатских диссертаций в 2000-2021 гг

Для научной школы НИУ "МЭИ" характерно преобладание темы комплексного использования ВИЭ – 15 работ (рис. 3), далее следует солнечная энергетика – 13 и гидроэнергетика – 11.

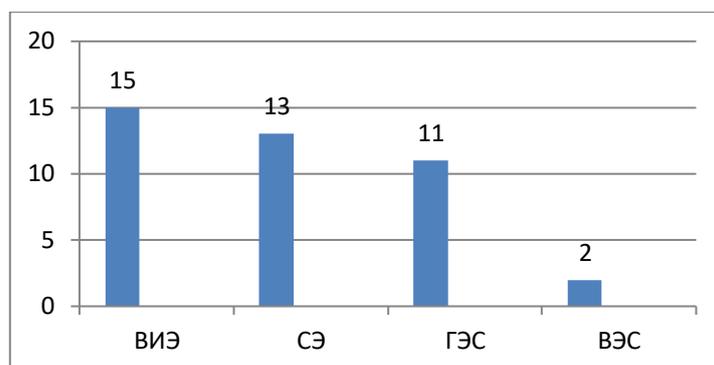


Рис. 3. Тематика кандидатских диссертаций МЭИ

Для третьего лидера РФ по числу диссертаций – ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, лидирует тема солнечной энергетики – 23 работы (рис. 4), что объяснялось научной специализацией руководителя ФГБНУ ФНАЦ ВИМ академика РАН, д.т.н., профессора Дмитрия Семеновича Стребкова (1937-2021).

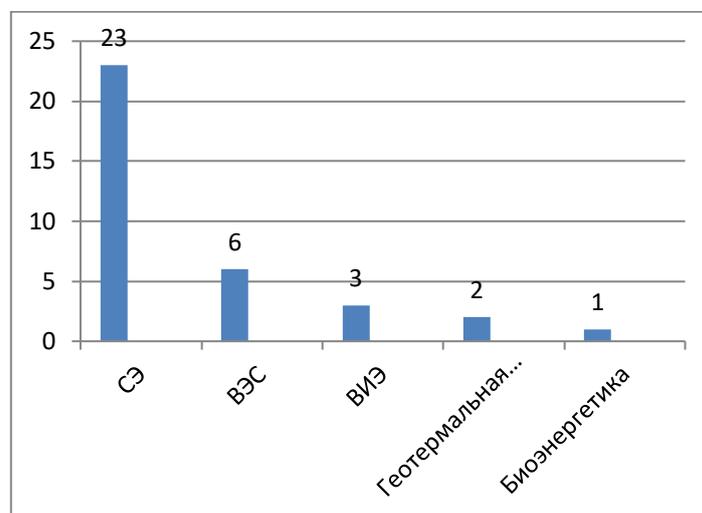


Рис. 4. Тематика кандидатских диссертаций ВИМ

Аналогично, в деятельности диссовета СПбПУ преобладает гидроэнергетика (рис. 5), лидером которой является академик Ю.С. Васильев.

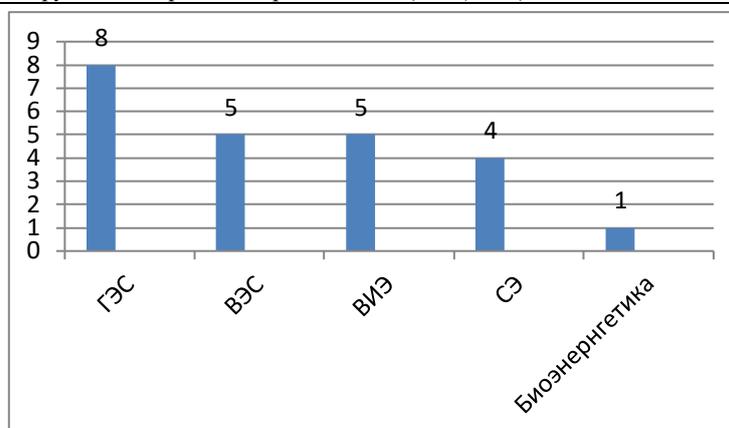


Рис. 5. Тематика кандидатских диссертаций СПбПУ

Из 13 докторских диссертаций по ВИЭ (табл. 1) за период с 1998 по 2021 гг. большая часть работ – 8, посвящена комплексному использованию ВИЭ, 3 работы по ветроэнергетике. Преобладают диссертации, защищенные в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – 4. На втором месте - диссовет СПбПУ – 3 работы. Диссертанты в основном представляют научные школы Д.С. Стребкова (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Ю.С. Васильева и В.В. Елистратова (СПбПУ), В.И. Виссарионова (НИУ "МЭИ"), д.т.н. профессора Б.В. Тарнижевского (АО «ЭНИН»).

Таблица 1. Докторские диссертации по возобновляемой энергетике в 1998 - 2021 гг.

№	Фамилия, имя, отчество автора	Тема диссертации (год защиты и диссовет - научная специальность в 2021 г.)
1	Ковалев Александр Андреевич	Технологии и технико-экономическое обоснование производства биогаза в системе утилизации навоза животноводческих ферм (1998, ВИЭСХ, Д.212.229.17 - 05.14.08)
2	Бреусов Владимир Петрович	Использование возобновляемых источников энергии в комбинированных автономных энергосистемах (2002, СПбПУ Д212.229.17 - 05.14.08)
3	Бутузов Виталий Анатольевич	Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии (2004, ЭНИН - 05.14.08)
4	Амерханов Роберт Александрович	Совершенствование методов оценки сельскохозяйственных энергоустановок на основе ВИЭ (2004, ВИЭСХ Д.212.229.17 - 05.14.08)
5	Муравьев Олег Алексеевич	Особенности гидромеханических переходных процессов на низконапорных гидроэлектростанциях с учетом крутильных колебаний вращающихся частей агрегатов (2005, МГСУ - 05.14.08)

№	Фамилия, имя, отчество автора	Тема диссертации (год защиты и диссовет - научная специальность в 2021 г.)
6	Николаев Владимир Геннадьевич	Методическое ресурсное и технико-экономическое обоснование развития ветроэнергетики в России (2011, СПбПУ Д212.229.17 - 05.14.08)
7	Соломин Евгений Викторович	Методологические основы разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок для агропромышленного комплекса России (2013, АГТУ (Барнаул), Д 212.004.02 - 05.20.02)
8	Бабаев Баба Джабраилович	Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников энергии с фазопереходным аккумулированием тепла (2016, ОИВТ РАН, Москва, Д.006.110.02 - 05.14.01)
9	Велькин Владимир Иванович	Методология определения параметров энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для электро- и теплоснабжения автономных объектов (2018 г., СПбПУ Д212.229.17 - 05.14.08)
10	Гусаров Валентин Александрович	Разработка генерирующего комплекса сельской микросети с применением возобновляемых источников энергии (2019 г., ВИМ, Москва, Д006.110.02 - 05.14.08)
11	Майоров Владимир Александрович	Разработка и исследование предельных фотоэлектрических и тепловых характеристик энергоустановок когенерационного преобразования концентрированного солнечного излучения для электро- и теплопотребителей (2019 г., ВИМ, Москва, Д006.110.02 - 05.14.08)
12	Пенджиев Ахмед Мырадович	Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане (2020, ВИМ, Москва, Д 006.110.02 - 05.14.08)
13	Алексеенко Виталий Алексеевич	Научно-технические аспекты разработки и функционирования автономных вертикальных осевых роторных ветроэнергетических установок для сельскохозяйственных потребителей (2022, ВИМ, Москва, Д 006.110.02 - 05.14.08)

4 Лидеры научно-образовательной деятельности

В подготовке ученых большое значение имеет – личность и идеи руководителя диссертации. Выбор темы и подготовка квалификационных работ осуществляется наиболее квалифицированными и опытными учеными, имеющим научный

авторитет и умение воспитывать достойную смену. Таких людей можно назвать лидерами науки-возобновляемой энергетики. Лидером среди наставников является С.Е. Щеклеин (ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "УрФУ"), который подготовил к защите кандидатских диссертаций 22 человека, в т.ч. по ВИЭ – 8, пять докторов наук, в т.ч. одного по ВИЭ. С.Е. Щеклеин защитил докторскую диссертацию в 1991 г. по атомной тематике, а подготовкой специалистов по ВИЭ занимается с 1997 г. Он автор 450 научных работ, в т.ч. трех монографий, 80 патентов, с 2019 г. руководит диссоветом УрФУ по специальности 05.14.08. По инициативе Сергея Евгеньевича ежегодно проводятся конференции и олимпиады для студентов, аспирантов и молодых ученых по ВЭ.

На втором месте д.т.н., профессор Михаил Георгиевич Тягунов (ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"), который воспитал 12 кандидатов наук, в т.ч. трех по ВЭ. После защиты в 1996 г. докторской диссертации по гидроэнергетике он специализируется на системном анализе процессов и систем управления энергетическими объектами, в т.ч. с использованием ВИЭ, возглавляет диссовет НИУ "МЭИ", имеет опыт реализации программы по образованию управленческих кадров, автор 170 научных трудов.

Под руководством д.т.н. профессора Виктора Васильевича Елистратова (ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет") были подготовлены 10 кандидатских диссертаций, в т.ч. шесть по ВИЭ (солнечная, геотермальная энергетика и биоэнергетика). Он с 1999 г. заведовал кафедрой «ВИЭ и гидроэнергетика», а в настоящее время руководит НОЦ «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбПУ. В центре его научных интересов разработка теоретических и технологических основ преобразования, комплексного использования и аккумулирования возобновляемой энергии в арктических условиях.

Инициатором развития ВЭ на Южном Урале является д.т.н. профессор Ирина Михайловна Кирпичникова (ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "ЮУрГУ"), заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения». Ирина Михайловна подготовила к защите 9 кандидатов наук, в т.ч. трех по ВИЭ, а также д.т.н. по ветроэнергетике Соломина Евгения Анатольевича, который также подготовил к защите четырех кандидатов наук по ВИЭ.

Руководители диссертаций из ФГБНУ ФНАЦ ВИМ д.т.н., профессор В.В. Харченко и В.М. Евдокимов, являются признанными специалистами по солнечной энергетике. Валерий Владимирович Харченко подготовил к защите восемь кандидатов наук, в т.ч. пять по солнечной и геотермальной энергетике. Владимир Михайлович Евдокимов подготовил по солнечной энергетике пять кандидатов и одного доктора наук.

В Краснодарском крае признанным лидером ВЭ является д.т.н. профессор Роберт Александрович Амерханов (Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (КубГАУ)), который на кафедре электротехники, теплотехники и ВИЭ ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ подготовил к защите семь кандидатов наук, в т.ч. трех по ВИЭ. Он является научным руководителем журнала

«Энергосбережение и водоподготовка», в котором в настоящее время преобладают статьи по ВИЭ.

Крупнейший российский специалист по геотермальной энергетике д.т.н. профессор Алибек Басирович Алхасов (Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики ОИВТ РАН) более 30 лет возглавляет единственную специализируемую по геотермии российскую организацию – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук (ИПГ ДНЦ РАН). Он подготовил по этой теме семь кандидатов и двух докторов наук.

5 Выводы

1. В России подготовка аспирантов по ВИЭ по техническим специальностям в 2021 г. велась в семи ВУЗах и одним научным учреждением РАН в количестве 83 человек, что при планируемой ежегодной аттестации до 15 человек явно недостаточно. Только бакалавров и магистров по специальности «Электроэнергетика и электротехника» в стране готовят 50 ВУЗов. В 2021 г эксплуатировались 69 сетевых СЭС, 22 сетевых ВЭС, более десяти заводов по производству фотоэлектрических модулей и оборудования ветроэнергетики.

2. За последние 20 лет в восьми диссоветах РФ по возобновляемой энергетике были защищены 117 кандидатских диссертаций. Их количество за последние четыре года (срок действия диссоветов) уменьшилось вдвое. По числу защит в области ВИЭ лидировала отмененная в 2022 г. научная специальность 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии. (109 диссертаций). Отмена этой специальности выполнена без должной дискуссии, в том числе с участием ведущих ученых по возобновляемой энергетике.

3. Лидерами по числу защит являются: НИУ "МЭИ", ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и СПбПУ, а по тематике солнечная энергетика, комплексы ВИЭ, гидроэнергетика и ветроэнергетика. В постсоветское время темы диссертаций в основном определяются научной специализацией руководителей. Так, в работах ФГБНУ ФНАЦ ВИМ преобладала солнечная энергетика. Подавляющее их большинство были выполнены под руководством крупнейшего ученого по фотоэнергетике академик РАН, д.т.н. профессора Д.С. Стребкова.

4. За последние 23 года в шести диссоветах были защищены 11 докторских диссертаций по ВЭ. Из них больше всего в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – 6. Преобладала тема использования комплекса ВИЭ – 8 работ. По ветроэнергетике были защищены 3 диссертации. Такое количество подготовленных докторов наук крайне мало, если учесть, что в России 15 кафедр готовят бакалавров и магистров по ВЭ. Тематика диссертаций должна основываться на научной концепции развития возобновляемой энергетике, в разработке которой определяющую роль должна играть РАН.

5. По результатам 20 летнего анализа защищенных кандидатских и докторских диссертаций установлены их руководители, подготовившие трех и более ученых. В числе лидеров д.т.н. профессор С.Е. Щеклеин (УрФУ), д.т.н. профессор М.Г.

Тягунов (НИУ "МЭИ"), д.т.н. профессор В.В. Елистратов, д.т.н. профессор И.М. Кирпичникова. Изучение опыта этих руководителей чрезвычайно важно для будущего отечественной науки.

Литература

1. Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского. URL: <https://enin.su/> . Дата обращения – 20.06.2022.
2. НИУ МЭИ. URL: <https://mpei.ru/Pages/default.aspx> . Дата обращения – 20.06.2022.
3. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. URL: <https://vim.ru/> . Дата обращения – 20.06.2022.
4. Санкт-Петербургский политехнический университет. URL: <https://www.spbstu.ru/> . Дата обращения – 20.06.2022.
5. Уральский федеральный университет. URL: <https://urfu.ru/> . Дата обращения – 20.06.2022.
6. Южно-Уральский государственный университет. URL: <https://www.susu.ru/ru> . Дата обращения – 20.06.2022.

References

1. Energy Institute named after G.M. Krzyżanowski. URL: <https://enin.su/> . Reference date – 20.06.2022.
2. National research university MPEI. URL: <https://mpei.ru/lang/en/Pages/default.aspx> . Reference date – 20.06.2022.
3. FGBNU FNAC VIM. URL: <https://vim.ru/english/> . Reference date – 20.06.2022.
4. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. URL: <https://english.spbstu.ru/> . Reference date – 20.06.2022.
5. Ural Federal University. URL: <https://urfu.ru/> . Reference date – 20.06.2022.
6. South-Ural State University. URL: <https://www.susu.ru/ru> . Reference date – 20.06.2022.

Highly qualified scientific personnel in renewable energy in 2000-2021: postgraduate studies, dissertation councils, scientific supervisors

Vitaly Butuzov^{1,3},

Dmitry Budnikov^{2,4}

¹FGBOU Kuban' State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

²FGBNU Federal Scientific Agro-Engineering Centre VIM

³E-mail: ets@nextmail.ru,

⁴E-mail: dimml3@inbox.ru

Abstract. The basic information about the postgraduate studies of 7 technical universities and one scientific institution, in which in 2021 the training of scientists in the direction of 14.06.01 - Nuclear, thermal, renewable energy and related technologies with specialization 05.14.08 – Energy installations based on renewable energy types was conducted. A total of 83 people were enrolled in them in 2021. The results of the analysis of the defenses of 117 Candi-Danish dissertations prepared by technical universities on VE from 2000 to 2021 are presented. with an indication of the leading organizations in terms of the number of protections, distribution by types of RE in general for all organizations and for the three leading ones. The data of 13 doctoral dissertations defended in 1998-2021 in the technical sciences of VE with their distribution by subject are presented. It is noted that the scientific level of dissertations is determined by the personality of the head of dissertations. The list of 12 scientific supervisors who have prepared three or more graduate students in VE for the defense is given.

Keywords: renewable energy, renewable energy sources, power generation, educational centers, graduate schools, PhD, doctoral dissertations, dissertation supervisors, dissertation councils.

УДК 332.1:339.977:620.92:620.98:910.3:913

Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной экономике в России к 2060 году

Дегтярев Кирилл Станиславович ^[0000-0002-1738-6320]1,2

Синюгин Олег Анатольевич ^[0000-0001-5874-4342]1,3

Берёзкин Михаил Юрьевич ^[0000-0002-6945-2131]1,4

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail: kir1111@rambler.ru, ³E-mail: olegsinyugin@yahoo.com, ⁴E-mail: mberezkin@inbox.ru

Аннотация. В статье содержится оценка инвестиционных затрат, необходимых в случае перехода России к полностью безуглеродной экономике к 2060 г. Расчёты основаны на данных о текущем энергопотреблении в России и его прогнозе, с допущением, что вся потребность в энергии удовлетворяется только за счет неуглеродных энергоносителей, использованным авторами ранее для расчёта оценки инвестиционных затрат на глобальный энергетический переход. Авторы приходят к выводу, что применительно к России они составят около 400 трлн. рублей при снижении оценок до величины около 160 трлн. рублей при учёте поглощения углерода российскими лесами на уровне средних оценок. В первом случае потребуется резкое, 2-3-кратное, увеличение инвестиций в энергетику России, и в обоих случаях потребуется кардинальное изменение их структуры в пользу строительства электростанций на безуглеродных энергоносителях за счёт углеводородного сектора. В то же время, учёт поглощающей способности лесов России на уровне максимальных оценок означает, что цель углеродной нейтральности уже достигнута и не требует дополнительных инвестиций.

Ключевые слова: безуглеродная экономика, энергопереход, инвестиционные затраты, атомная энергетика, гидроэнергетика, ветровая энергетика, солнечная энергетика, энергетика России.

1 Введение

Ранее нами были проведены расчёты инвестиционных затрат на переход к полностью безуглеродной экономике в глобальном масштабе [1]. В настоящее время

такого рода расчёты проводят отдельные аналитические агентства и в отношении России – в частности, аналитик ВТБ-Капитал подсчитали, что достижение углеродной нейтральности может обойтись России в величину от 100 до почти 500 трлн. рублей [2]. Мы ставим перед собой ту же задачу – оценку стоимости энергетического перехода для России, используя для её решения подход, применённый нами ранее в отношении глобальной экономики, основанный на следующих данных и допущениях:

- энергопотребление в России и его прогнозы;
- необходимость удовлетворения потребностей в энергии исключительно за счёт электростанций, работающих на неуглеродных источниках (атомных, гидроэлектростанций, ветровых и солнечных электростанций);
- инвестиционные затраты на строительство этих станций в требуемом объёме мощностей, исходя из данных об удельных инвестиционных затратах.

Для России расчёт проводится, исходя из заявленной нашей страной цели достижения углеродной нейтральности экономики к 2060 году [3], следуя Рамочной конвенции ООН по изменению климата [4] и Парижскому соглашению по климату [5]. Рассматривается несколько сценариев, с одной стороны, без учёта и с учётом способности лесов России к поглощению CO₂, с другой – различных оценок энергопотребления России на перспективу.

2 Материалы и методы

Нами использованы статистические данные ВР, Росстата, Министерства энергетики РФ и других официальных и корпоративных источников по энергопотреблению, оценкам инвестиционных затрат для разных типов электростанций, их установленным мощностям и выработке энергии. Мы также используем собственный прогноз энергопотребления в России. На этой основе нами проводятся расчеты мощностей, необходимых для обеспечения России безуглеродной энергией, и инвестиционных затрат на их строительство.

Мы рассматриваем сценарий внутреннего энергопотребления в России до 2060 года, заявлявшегося в качестве срока перехода к безуглеродной экономике [3], при котором оно вырастет с текущих (2020) 1 105 млн. тонн условного топлива (т.у.т.) [6], или 9000 ТВтч в год до 13 000 ТВтч к 2060 году, или в 1,4-1,5 раза. Данное допущение основано на следующих исходных посылах:

1) Средние годовые темпы роста потребления первичных энергоресурсов в России в 2005-2020 гг. (рис.1) составляли 1,1%; два периода спада потребления – в 2009 и 2015 гг., компенсировались более высокими темпами восстановительного роста в следующие годы; экстраполяция данной величины роста даёт 12 400 ТВтч (1500 млн. т.у.т.) к 2050 году и 13 700 ТВтч (1700 млн. т.у.т.) к 2060 году;

2) Сравнение душевого энергопотребления в России, с одной стороны, и сопоставимых с нею стран - Канады, США и Австралии. Душевое энергопотребление

[7] в кВтч в год составляет в России – 54 000, в Канаде – 100 000, в США – 74 000, в Австралии – 61 000. Цели экономического развития страны и роста благосостояния граждан в России диктуют рост энерговооружённости и внутреннего энергопотребления.

Отметим, что и душевая эмиссия парниковых газов [8] в CO_2 – эквиваленте в России ниже; в тоннах в год: в России – 11,4, в Канаде – 18,6, в США – 15,5, в Австралии – 17,1.

Следует добавить также, что производство первичных энергоресурсов в России в 1,6 – 1,7 раза превышает их внутреннее потребление; около 40% всех производимых в стране энергоресурсов идут на экспорт, и ключевым рынком их сбыта являются европейские страны. В связи с пиком политического обострения в 2022 году между Россией и Западом вероятно снижение экспортных возможностей России, что, с другой стороны, создаёт дополнительные предпосылки для роста потребления энергии внутри страны.



Рис. 1. Производство и потребление первичных энергоресурсов в России (по данным [6]); пунктиром обозначена линейная аппроксимация динамики производства и потребления энергоресурсов

Таким образом, в наших расчётах мы ориентируемся на годовое энергопотребление в России на уровне 13 000 ТВтч. Далее, как и в [1], мы делаем допущение, что переход на полную углеродную нейтральность означает полное удовлетворение потребностей в данном количестве энергии только за счёт электроэнергии, производимой в данном количестве исключительно из неуглеводородных источников – на атомных (АЭС), гидравлических (ГЭС), ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанциях. В отличие от [1] мы допускаем, исходя из специфики

энергетических ресурсов России, что в данном случае электроэнергия будет производиться в следующих соотношениях: на АЭС и ГЭС – по 40% (по 5 200 ТВтч в год), на ВЭС и СЭС – по 10% (по 1 300 ТВтч в год).

Далее мы рассчитываем требуемые для производства данного количества энергии мощности, исходя из их среднего коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) по формуле:

$$C_r = Pr / (8760 * C_f) \quad (1)$$

где:

- C_r (ГВт) – требуемые мощности;
- Pr (ГВтч) – требуемое производство энергии;
- C_f (%) – КИУМ;
- 8760 – количество часов в году.

Использованы данные [9] по КИУМ электростанций разных типов в России. Далее из полученного общего количества требуемых мощностей мы вычитаем объём уже существующих мощностей каждого типа электростанций (также использованы данные [9]) и получаем дополнительные мощности, которые требуется построить (табл. 1).

Для простоты мы, так же, как и в предыдущих расчётах [1], не учитываем (хотя это и занижает реальные затраты) тот факт, что к 2060 году часть существующих мощностей уже будет выведена из эксплуатации и их тоже придется заменять.

В качестве примера, для атомной энергетики (табл. 1) расчет выглядит следующим образом:

- Требуемая годовая выработка электроэнергии – 5 200 ТВтч;
- КИУМ – 85%;
- Требуемые мощности – $5\,200 / (8760 * 85\%) = 0,7$ ТВт (699 ГВт);
- Мощности, имеющиеся к настоящему времени – 30 ГВт (табл.3);
- Требуемые дополнительные мощности – $699 - 30 = 669$ ГВт.

Таблица 1. Требуемые мощности электростанций для обеспечения функционирования экономики России в режиме углеродной нейтральности

1	2	3	4	5	6	7	8
АЭС	40%	5 200	85%	698	30	669	17
ГЭС	40%	5 200	45%	1 319	50	1 269	32
ВЭС	10%	1 300	30%	495	2	493	12
СЭС	10%	1 300	15%	989	2	987	25
Всего	100%	13 000		3 502	83	3 418	85

1 - Тип станции; 2 - Доля станций данного типа в общем производстве ЭЭ; 3 – Требуемое производство ЭЭ на станциях данного типа, ТВтч; 4 – средний КИИМ станций данного типа; 5 - Требуемые мощности станций данного типа, ГВт; 6 - Имеющиеся мощности (на 01.01.2022), ГВт; 7 - **Требуемые дополнительные мощности, ГВт**; 8 - Требуемый ежегодный ввод мощностей до 2060, ГВт

Затем мы используем информацию о средних инвестиционных затратах на единицу (руб./кВт) установленной мощности для каждого типа электростанции и, умножая данную величину на общее количество требуемых дополнительных мощностей, получаем общую сумму требуемых инвестиционных затрат (табл. 2). Для удельных инвестиционных затрат АЭС использовались данные Росатома [10], для электростанций на основе ВИЭ – данные Минэнерго РФ [11]. Данные использовались с корректировкой в сторону некоторого уменьшения.

В качестве примера, если для атомного энергоблока средние удельные инвестиционные затраты равны 150 000 руб./кВт, или 150 млрд. руб./ГВт, при этом, требуется ввести ещё 669 ГВт АЭС (табл. 1), тогда общие инвестиционные затраты составят 100 000 млрд., или 100 трлн. рублей (табл. 2).

3 Результаты и обсуждение

По расчётам на основе данного подхода, итоговое значение инвестиционных затрат на переход к полностью безуглеродному энергообеспечению в России (табл. 2) составило около 400 трлн. рублей, или примерно 10 трлн рублей в год к 2060 г., что составляет порядка 8,6% номинального ВВП России 2021 г. [12]). Это примерно вдвое выше средней доли в мировом ВВП, рассчитанной нами ранее [1], что объясняется спецификой российского энергообеспечения, требующей более высоких энергозатрат вследствие большей составляющей энергоёмких отраслей в экономике, климатических условий, расстояний, структуры расселения населения и размещения производства.

Исходя из курса рубля к доллару США, равного 65, российские затраты составят около \$6 трлн., или 5% от общемировых, что примерно соответствует доли России в мировом потреблении первичных энергоресурсов [7], составляющей около 5,6%. Также цифра в 400 трлн. рублей близка к верхней границе оценки, приводимой аналитиками ВТБ [2].

Таблица 2. Расчёт инвестиционных затрат на полное энергообеспечение за счёт неуглеродных источников в России

Тип ЭС	Треб.доп. мощности, ГВт (табл. 1)	Удельные инвест. затраты, млн.руб./ГВт	Всего затраты, млрд. руб.	Год. затраты до 2060 г., млрд. руб.
АЭС	669	150 000	100 323	4 759
ГЭС	1 269	150 000	190 376	2 508
ВЭС	493	85 000	41 874	1 047
СЭС	987	65 000	64 180	1 605
Всего	3 418	116 077	396 753	9 919

Решение данной задачи требует общего увеличения электроэнергетических мощностей неуглеродных станций на 3 400 ГВт (табл. 1), или, до 2060 года, их ежегодного роста на 85 ГВт.

В реальности, увеличение всех генерирующих электроэнергетических мощностей в России идёт со скоростью порядка 1 ГВт в год – с 243 ГВт на конец 2018 года до 247 ГВт на конец 2021 года [9], что в 80 раз меньше.

Общий объём инвестиций в ТЭК составил в 2021 году 4,4 трлн. рублей [13], что, в свою очередь, в 2,5 раза ниже объёма инвестиций только на создание неуглеродных генерирующих мощностей, требуемых для перехода к полностью безуглеродной энергетике.

Общий объём всех инвестиций в основной капитал в России в 2017-2020 гг. составлял 16-19 трлн. рублей в год [14], или всего в 1,6-1,9 раза выше требуемого только для энергетического перехода, в том числе, по позиции «обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха» - порядка 1,1 трлн. рублей в год; «добыча угля, сырой нефти и природного газа» - 2,5 трлн., «производство нефтепродуктов» - 0,6 трлн. [15]; в сумме также порядка 4,0-4,5 трлн. рублей в год, при этом около 80% этой суммы приходится на углеводородный сектор, в значительной степени работающий на экспорт и производящий в 1,7 раз больше энергоресурсов, чем используется внутри страны (см. выше).

Таким образом, переход к полностью неуглеродной экономике к 2060 году потребовал бы 2-3-кратного увеличения инвестиций в ТЭК относительно нынешнего уровня. Отметим, что такой же разрыв между фактическим и требуемым для энергетического перехода объёмом инвестиций в энергообеспечение фиксируется на мировом уровне [1].

Эти оценки могут быть уменьшены, если исходить из сохранения годового энергопотребления на уровне 9 000 ТВтч. В этом случае капитальные затраты можно оценить в величину меньшую, соответственно, в 1,4 раза – порядка 275 трлн. рублей, или 7,9 трлн. (7% ВВП) в год до 2060 года, но это существенно не сокращает разрыва между требуемым и фактическим объёмом инвестиций.

4 Оценки затрат на переход к углеродной нейтральности с учётом поглощения CO₂ естественными лесными экосистемами

Отдельным вопросом, являющимся предметом разночтений, остаётся само понятие безуглеродной или углеродно-нейтральной экономики в силу неопределённости формулировок в отношении учёта поглощающей способности лесов [16]. В случае включения её в расчёты следует учитывать, что её оценки варьируются в очень широком диапазоне, согласно которым чистое поглощение углерода российскими лесами составляет от 100 млн. до 700 млн. тонн углерода/год [17; 18<https://www.interfax.ru/russia/803654>], или от 400 млн. до 2500 млн.т. в CO₂ – эквиваленте.

Общий объём антропогенных выбросов парниковых газов в России в CO_2 – эквиваленте оценивается примерно в 1 700 млн. тонн [8]. При росте первичного потребления энергоресурсов с нынешних 9000 до 13 000 ТВтч в год (см. выше) с сохранением существующей структуры и технологий ТЭК этот объём можно будет оценить примерно в 2 450 млн. тонн – равным максимальным оценкам поглощающей способности лесов России.

Включая в понятие создания безуглеродной экономики учёт поглощающей способности лесов, компенсирующих антропогенные выбросы, и беря в расчёт среднее значение в пределах указанного выше интервала – порядка 1 450 млн. тонн, можно сказать, что требуется предотвращение не 2 500, а 1 000 млн. тонн годовой эмиссии CO_2 ; соответственно, требуемый объём инвестиций можно оценить в величину, пропорционально меньшую – не 400 трлн., а около 160 трлн. рублей, или 4 трлн. рублей в год (около 3,4% ВВП страны) до 2060 года. Это сопоставимо с текущим объёмом инвестиций в ТЭК, но также потребовало бы существенного изменения направления потоков инвестиций в сторону форсированного строительства электростанций на неуглеродных источниках за счёт инвестиций в углеводородный сектор.

В то же время, в зависимости от подходов к прогнозам энергопотребления, с одной стороны, и оценкам поглощающей способности лесов России – с другой, инвестиционные затраты, требуемые для перехода к углеродно-нейтральной экономике, можно оценить в очень широком диапазоне, где 400 трлн. – верхняя граница (табл.3).

Соответственно, исходя из текущего уровня энергопотребления и связанных с ним антропогенных выбросов парниковых газов, и средних оценок их поглощения лесами, требуемый объём инвестиций для перехода к углеродной нейтральности можно оценить в величину, на порядок меньшую – около 40 трлн. рублей.

Таблица 3. Оценка затрат на переход России к углеродной нейтральности экономики (трлн. руб.) в зависимости от учёта поглощающей способности лесов и прогнозов энергопотребления

Потребление энергии, ТВтч/год (выбросы CO_2 , млн. тонн/год)	Оценка поглощающей способности лесов, млн. тонн CO_2 -экв/год. [17; 18 https://www.interfax.ru/russia/803654]			
	2 500	1 450	400	Не учитывается
9 000 (1700)	-	40	210	275
13 000 (2450)	-	160	335	400

Более того, исходя из максимальной оценки поглощающей способности - на уровне 2 500 млн. тонн, можно утверждать, что поглощение CO_2 существенно превышает антропогенные выбросы и, таким образом, экономика России уже является углеродно-нейтральной и даже «углеродно-отрицательной».

5 Выводы

Применённый ранее способ оценки стоимости перехода энергетики к полной углеродной нейтральности через представление необходимого энергообеспечения в энергетическом эквиваленте и оценку инвестиционных затрат на строительство требуемых для выработки данного количества энергии электростанций, применительно к России даёт величину около 400 трлн. рублей, или 10 трлн. рублей в год до 2060 года.

Это потребовало бы 2-3-кратного увеличения инвестиций в ТЭК относительно текущего уровня с кардинальным изменением структуры вложений в направлении форсированного строительства электростанций на неуглеродных энергоносителях за счёт производства углеводородов, на которые в настоящее время приходится большая часть всех инвестиций в ТЭК.

Учёт поглощения CO₂ естественными экосистемами при существующих в настоящее время средних оценках поглощающей способности российских лесов (на уровне около 1400-1500 млн. тонн CO₂ – эквивалента в год) снижает оценку требуемых затрат примерно в 2,5 раза до 160 трлн. рублей, или 4 трлн. рублей в год, что сопоставимо с нынешним уровнем инвестиций в ТЭК, но также потребовало бы кардинальной перестройки потока инвестиций.

В то же время, исходя из максимальных оценок поглощения парниковых газов российскими лесами, можно утверждать, что оно существенно выше антропогенных выбросов и, таким образом, экономика России уже является углеродно-нейтральной, более того – имеет существенный запас увеличения эмиссии.

Благодарность

Статья подготовлена в соответствии с госбюджетной темой «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» (121051400082-4).

Литература

1. Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Подходы к оценке инвестиционных затрат на глобальный энергетический переход // Окружающая среда и энергосистемы. – 2022 - №1 – с. 4-17.
2. Бойко А. Аналитики подсчитали цену декарбонизации для России // Ведомости, 30 ноября 2021 г. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2021/11/29/898145-analitiki-dekarbonizatsii> - дата обращения 09.06.2022.
3. Россия будет добиваться углеродной нейтральности к 2060 году // URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1411842> - дата обращения 09.06.2022.
4. United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <https://clck.ru/VtLRX> - дата обращения 09.06.2022.
5. The Paris Agreement. URL: <https://clck.ru/V7PNB> - дата обращения 09.06.2022.
6. Баланс энергоресурсов 2005-2020. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/search?q=баланс+энергоресурсов> - дата обращения 15.06.2022.

7. Statistical Review of World Energy - 2021. BP. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> - дата обращения 15.06.2022.
8. CO₂ Emissions by Country. URL: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country/> - дата обращения 15.06.2022.
9. Отчёт о функционировании ЕЭС России в 2021 году. Системный оператор Единой Энергетической системы. URL: https://www.so-ops.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf - дата обращения 15.06.2022.
10. Росатом... URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/25/121255> - дата обращения 15.06.2022.
11. Министерство энергетики РФ... URL: <https://minenergo.gov.ru/node/489> - дата обращения 15.06.2022.
12. Национальные счета. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts/> - дата обращения 15.06.2022.
13. Новак заявил, что объем инвестиций в ТЭК в 2021 году составил 4,4 трлн рублей. ТАСС. URL: https://tass.ru/ekonomika/14154959?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru - дата обращения 15.06.2022.
14. Росстат. URL: <https://fedstat.ru/indicator/59047> - дата обращения 15.06.2022.
15. Инвестиции в основной капитал в Российской Федерации по видам экономической деятельности. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/tab-inv-okved.htm> - дата обращения 15.06.2022.
16. Замолодчиков Д.Г. Углеродный цикл и изменения климата // Окружающая среда и энергетика. – 2021. - №2. – с.53-69.
17. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Курц В. А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели cbm-cfs3 // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. — 2014. — № 1. — С. 5–18.
18. BCG заявила, что поглощающая способность лесов РФ недооценена. Interfax. URL: <https://www.interfax.ru/russia/803654> - дата обращения 15.06.2022.

References

1. Berezkin M., Degtyarev K., Sinyugin O. An Approach to the Estimation of Investment Costs for the Global Energy Transition // Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES). – 2022 - №1 – p. 4-17.
2. Wojko A. AnalitikipodschtalacenudekarbonizaciidlyaRossii // Vedomosti, 30 November 2021. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2021/11/29/898145-analitiki-dekarbonizatsii> - reference date 09.06.2022.
3. Rossiyabudetdobivat'syauglerodnojejtral'nosti k 2060 godu // URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1411842> - reference date 09.06.2022.
4. United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <https://clck.ru/VtLRX> - reference date 09.06.2022.
5. The Paris Agreement. URL: <https://clck.ru/V7PNB> - reference date 09.06.2022. - reference date 09.06.2022.
6. Balance of Energy Resources 2005-2020. Rosstat. URL: <https://rosstat.gov.ru/search?q=баланс+энергоресурсов> - reference date 15.06.2022.

7. Statistical Review of World Energy - 2021. BP. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> - reference date 15.06.2022.
8. CO₂ Emissions by Country. URL: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country/> - reference date 15.06.2022.
9. Otchyot o funkcionirovanii EES Rossii v 2021 godu. Sistemny operator EdinojEnergeticheskoy sistemy. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf - reference date 15.06.2022.
10. Rosatom... URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/25/121255> - reference date 15.06.2022.
11. Ministerstvoenergetiki RF... URL: <https://minenergo.gov.ru/node/489> - reference date 15.06.2022.
12. National accounts. Rosstat. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts/> - reference date 15.06.2022.
13. Novak zayavil, chto ob"em investitsiy v TEK v 2021 godu sostavil 4,4 trln rublej. TASS. URL: https://tass.ru/ekonomika/14154959?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru - reference date 15.06.2022.
14. Rosstat. URL: <https://fedstat.ru/indicator/59047> - reference date 15.06.2022.
15. Investitsii v osnovnoy kapital v Rossijskoj Federacii po vidamekonomicheskoy deyatel'nosti. Rosstat. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/tab-inv-okved.htm> - reference date 15.06.2022.
16. Zamolodchikov D. Carbon Cycle and Climate Change // Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES). – 2021 - №3 – p. 53-69.
17. Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Kurc V. A. Vliyanie ob"emov lesopol'zovaniya na uglerodnyj balans lesov Rossii: prognoznyy analiz po modeli cbm-cfs3 // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva. — 2014. — № 1. — p. 5–18.
18. BCG zayavila, chtopogloshchayushchayasposobnost' lesov RF nedoocenena. Interfax. URL: <https://www.interfax.ru/russia/803654> - reference date 15.06.2022.

Estimations of the Investment Costs for Transition to Carbon-Free Economy in Russia by 2060

,Kirill Degtyarev^{1,2}, Oleg Sinyugin^{1,3}, Mikhail Berezkin^{1,4}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: kir1111@rambler.ru, ³E-mail: olegsinyugin@yahoo.com, ⁴E-mail: mberezkin@inbox.ru

Abstract. The article contains an estimation of the investment costs that are necessary in the case of entire non-carbon energy transition in Russia by 2060. The evaluations are based on a data on the current energy consumption in Russia and its forecasts, with an assumption that all the energy needs are to be satisfied with only non-carbon energy carriers the authors used earlier when estimating capital expenditures for the global energy transition. The authors concluded that in Russia they amount some 400 trillion rubles, and these evaluations can be decreased to 160 trillion rubles in the case absorption of CO₂ by the Russian forests under the medium estimations is taken into account. The first case requires a sharp, 2-3-fold increase of investments into Russian energy sector, and the both cases require a cardinal change of their structure in favor of non-carbon power stations at the expense of the hydrocarbon sectors.

At the same time, maximal estimation of the forests' absorption ability could meant that the goal of carbon neutrality has already achieved and it requires no additional investments.

Keywords: carbon-free economy, energy transition, investment costs, nuclear energy, hydro energy, wind energy, solar energy, energy industry of Russia

Acknowledgment

The article was prepared in accordance with the state budget theme "Geographical foundations of sustainable development of energy systems using renewable energy sources" (121051400082-4).

Анализ волновой энергии в Каспийском море

Мысленков Станислав Александрович^[0000-0002-7700-4398]^{1,2}

Киселева Софья Валентиновна^[0000-0001-5836-8615]^{1,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail: stasoccean@gmail.com, ³E-mail: k_sophia_v@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена анализу волновой энергии в Каспийском море за период с 1979 по 2020 г. Расчеты волновой энергии выполнены при помощи волновой модели WAVEWATCH III на нерегулярной сетке с шагом до 900 м в прибрежной зоне. Получены результаты о пространственной изменчивости потока волновой энергии и о его сезонной изменчивости. Максимальные значения потока энергии составляют около 5 кВт/м волнового фронта и проявляются в центральной части Каспийского моря. Обеспеченность волновой энергией 1 кВт/м в центральной части Каспийского моря составляет 50-55%, в северной части – не более 20%, а в южной 30-45%. Проведен анализ сезонной изменчивости потока энергии для трех точек, расположенных в разных частях моря. Сезонные изменения потока энергии наиболее выражены в центральной части моря: в летние месяцы поток энергии составляет 2-5 кВт/м, а в зимние увеличивается до 7-10 кВт/м. Максимальный среднемесячный поток волновой энергии составил 18.5 кВт/м волнового фронта.

Ключевые слова: Каспийское море, волновая энергия, моделирование волнения, WAVEWATCH III.

1 Введение

В последнее время наблюдается интерес к оценкам ветроэнергетического потенциала и волновой энергии в различных акваториях Мирового океана [1, 2, 3, 6, 7]. Энергия волн является одним из возобновляемых источников энергии, который может быть использована для получения электрической энергии [2, 3]. Распределение волновой энергии учитывается при расчете нагрузок на различные сооружения в море и в прибрежной зоне. Также энергия морских волн является одним из факторов, с воздействием которого связано разрушение берегов.

Каспийский регион характеризуется высокими ресурсами солнечной и ветровой энергии. Так, приходящая суммарная солнечная энергия на горизонтальную поверхность составляет 3,5 - 3,9 кВтч/м²/день (средняя за год суточная сумма);

в летний период увеличиваясь до 5,8 – 6,3 кВтч/м²/день. Это практически максимальные значения, наблюдаемые на территории России. Ветровые ресурсы также значительны: средняя за год скорость ветра в районе Дербента достигает 7,0 м/с на высоте 50 м, а удельная плотность энергии ветрового потока на той же высоте – 424 Вт/м². Значительные скорости ветра определяют и значительные удельные (на единицу волнового фронта) значения потока волновой энергии. Интерес к оценкам величины волновой энергии, таким образом, определяются не только задачами океанологии, но и потребностями возобновляемой энергетики.

Интерес к исследованиям энергии волн Каспийского моря был реализован в ряде исследований. [12, 13, 17]. В работе [17] на основе модели SWAN и реанализа Eга-Interim выполнено моделирование волнения и получены оценки волновой энергии в некоторых точках Каспийского моря. В работе [13] приводятся данные моделирования волновой энергии для южной части Каспийского моря. Волновой климат и повторяемость штормов в Каспийском море исследована в работах [4, 5, 10, 11, 14, 15].

В данном исследовании проведен анализ длительного ряда результатов моделирования ветрового волнения в Каспийском море за период с 1979 по 2020 гг. Рассматривается распределение волновой энергии в пространстве, ее сезонная изменчивость и обеспеченность.

2 Материалы и методы

Для расчета характеристик ветрового волнения в Каспийском море использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07 [16]. Эта волновая модель учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах, а также влияние морского льда.

Для генерации волн использована схема ST6, для расчета нелинейных взаимодействий схема DIA, для учета влияния льда схема IC0. Для учета воздействия придонного трения применялась схема JONSWAP, диссипация волновой энергии параметризуется в зависимости от отношения фазовой и групповой скоростей волн, а также глубины в точке. Спектральное разрешение модели составляло 36 направлений ($\Delta\theta = 10^\circ$), частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0.03 до 0.843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии составляет 60 секунд, шаг по времени для передачи энергии по спектру составляет 450 секунд.

При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979-2010) с пространственным разрешением $\sim 0.3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011-2020) с разрешением $\sim 0.2^\circ$. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 17529 узлов (рис. 1). Шаг сетки по пространству составляет ~ 15 км в открытом море и 900 м у берега. Ранее данная конфигурация модели и

вычислительной сетки использовалась для описания волнового климата Каспийского моря [10].

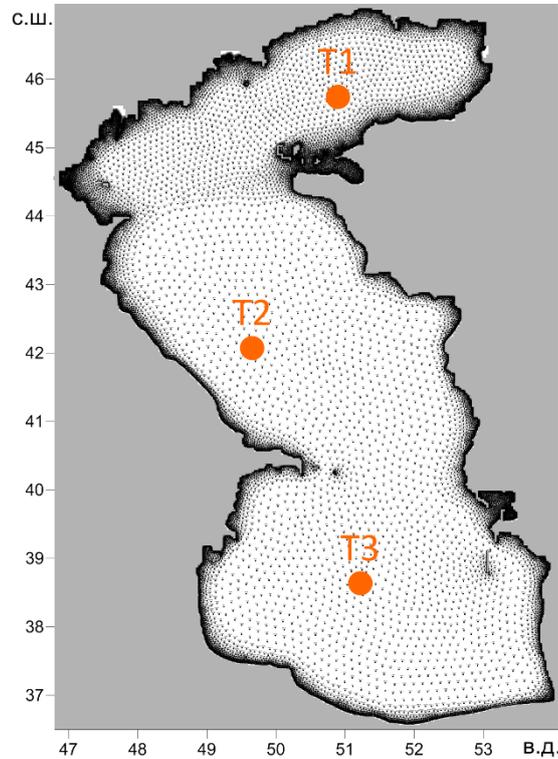


Рис. 1. Неструктурная вычислительная сетка для волновой модели Каспийского моря. Точки вывода данных обозначены оранжевыми кружками.

В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены следующие характеристики ветрового волнения за каждые 3 часа с 1979 по 2020 год (всего 42 года):

- высота значительных волн H_s (среднее значение высот от 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения или 13% обеспеченности),
- средний период волн,
- средняя длина волны,
- поток волновой энергии в кВт на метр фронта волны.

Поток волновой энергии на единицу фронта волны, определяется как:

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(\omega, h) E(\omega, \theta) d\theta d\omega \quad (1)$$

где $E(\omega, \theta)$ – частотно-направленный спектр энергии; $C_g(\omega, h)$ – групповая скорость; g – ускорение свободного падения, h – глубина, ρ – плотность морской воды, ω – частота волн, θ – азимутальный угол.

На основе данных о потоке волновой энергии были рассчитаны среднееголетние годовые значения, а также среднееголетние значения для отдельных месяцев и среднемесячные значения для трех точек в разных частях моря. В северной части Каспийского моря в зимний период часто присутствует морской лед. При наличии льда с концентрацией более 0.5 в модели высота волн и волновая энергия равны 0. При осреднении нулевые значения также учитывались. Также на основе данных моделирования рассчитывалась обеспеченность волновой энергией для пороговой величины 1 кВт/м. Обеспеченность представляет собой отношение количества значений ряда, когда перенос волновой энергии превышал заданный критерий к общему количеству значений всего ряда. Обеспеченность волновой энергией для критерия более 1 кВт/м рассчитывается по следующей формуле:

$$O_{1кВт} = \frac{m}{n} \cdot 100 \quad (2)$$

где m – количество случаев из выборки, когда перенос энергии P был более 1 кВт/м фронта волны, n – общее количество случаев выборки.

Обеспеченность волновой энергии меняется по пространству и рассчитывается для каждого узла расчетной сетки. Расчеты проводились для всей выборки.

3 Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования были рассчитаны среднееголетние значения потока волновой энергии для каждого узла вычислительной сетки. На рис.2 приведен среднееголетний поток волновой энергии для всего периода моделирования (за 42 года). Максимальные значения составляют около 5-5.3 кВт/м и расположен максимум в центральной части моря. В северной части из-за небольших глубин и присутствия льда в зимнее время поток энергии не превышает 0.6 кВт/м волнового фронта. Также рассчитывался среднееголетний поток волновой энергии для отдельных месяцев, чтобы оценить сезонную изменчивость. В январе максимальные значения потока волновой энергии находятся в центральной части моря и составляют более 8 кВт/м (рис.2). В августе максимум смещается к южной части моря и Апшеронскому полуострову и составляет до 3 кВт/м (рис.2). В южной части моря из-за небольших глубин и присутствия льда в зимний период поток энергии не превышает 1.

При оценках ресурсов и энергетического потенциала той или иной акватории очень важно рассматривать не только средние показатели, но и обеспеченность волновой энергией, которая позволяет рассчитать время работы волнового генератора. На рис.3 приведено распределение среднееголетней обеспеченности

потока волновой энергии для критерия (предельного значения) 1 кВт/м волнового фронта. Как видно из рисунка, в центральной части Каспийского моря приблизительно 50-55% времени поток волновой энергии превышает величину 1 кВт/м (рис.3). В северной части моря этот показатель не превышает 20%, а в южной – 30-45%. Важно отметить, что в южной части моря обеспеченность существенно уменьшается в прибрежной зоне, тогда как в средней части моря у берега проходят изолинии 40-45%. Так как потребители электроэнергии, как правило, находятся на побережье, то этот момент может иметь важное значение при планировании использования волновой энергии.

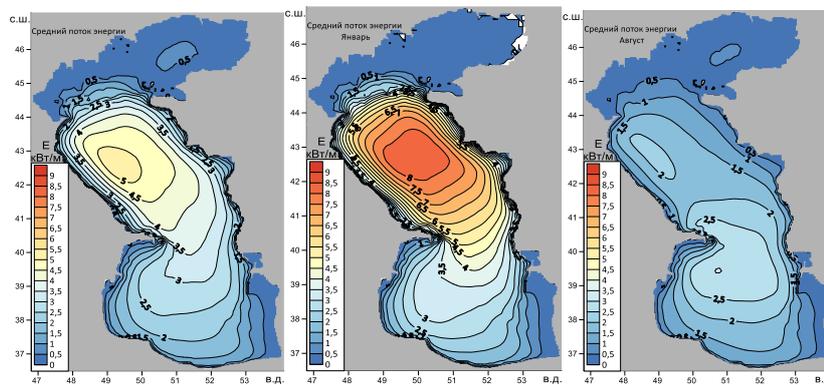


Рис. 2. Среднегодовое значение потока волновой энергии (кВт/м волнового фронта) в Каспийском море за период 1979–2020. Для всего года (а), для января (б) и для августа (в).

Анализ сезонной изменчивости потока энергии был проведен для трех точек, расположенных в разных частях Каспийского моря (рис.1). Графики изменения среднемесячного потока волновой энергии для периода с 1979 по 2020 гг. для каждой из точек приведены на рис.4. За весь период среднемесячный поток волновой энергии меняется от 0 (в северной части моря) или 0.4 (в центральной и южной) до 18.5 кВт/м. Максимум в северной части моря (точка 1) составляет 2.4 кВт/м волнового фронта и наблюдался в феврале 1995 года. В зимние месяцы в северной части моря наблюдается или нулевой, или совсем незначительный поток энергии волн из-за наличия морского льда.

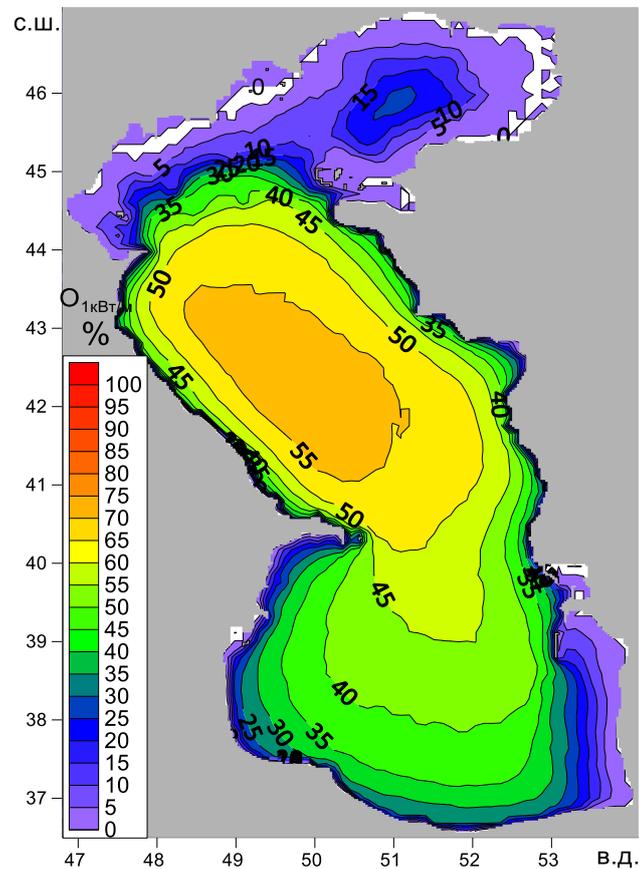


Рис. 3. Среднегоголетняя обеспеченность потока волновой энергии более 1 кВт/м.

Однако примерно с 2000 года льда становилось все меньше, и нулевые значения наблюдались не каждый год. В центральной части моря максимум потока волновой энергии составляет 18.4 кВт/м и наблюдался в феврале 2010 года. В точке 2 сезонные изменения потока энергии выражены очень сильно: в летние месяцы поток энергии составляет 2-5 кВт/м волнового фронта, а в зимние увеличивается до 7-10 кВт/м. С 2010 по 2016 год наблюдается увеличение среднего месячного потока в энергии в зимние месяцы до 15 кВт/м и более. В южной части моря (точка 3) средний поток энергии меньше чем в центральной и редко превышает 7-8 кВт/м. Сезонный ход здесь выражен не так сильно, происходит усиление потока энергии в зимние месяцы, однако и летом присутствуют значения 3-5 кВт/м.

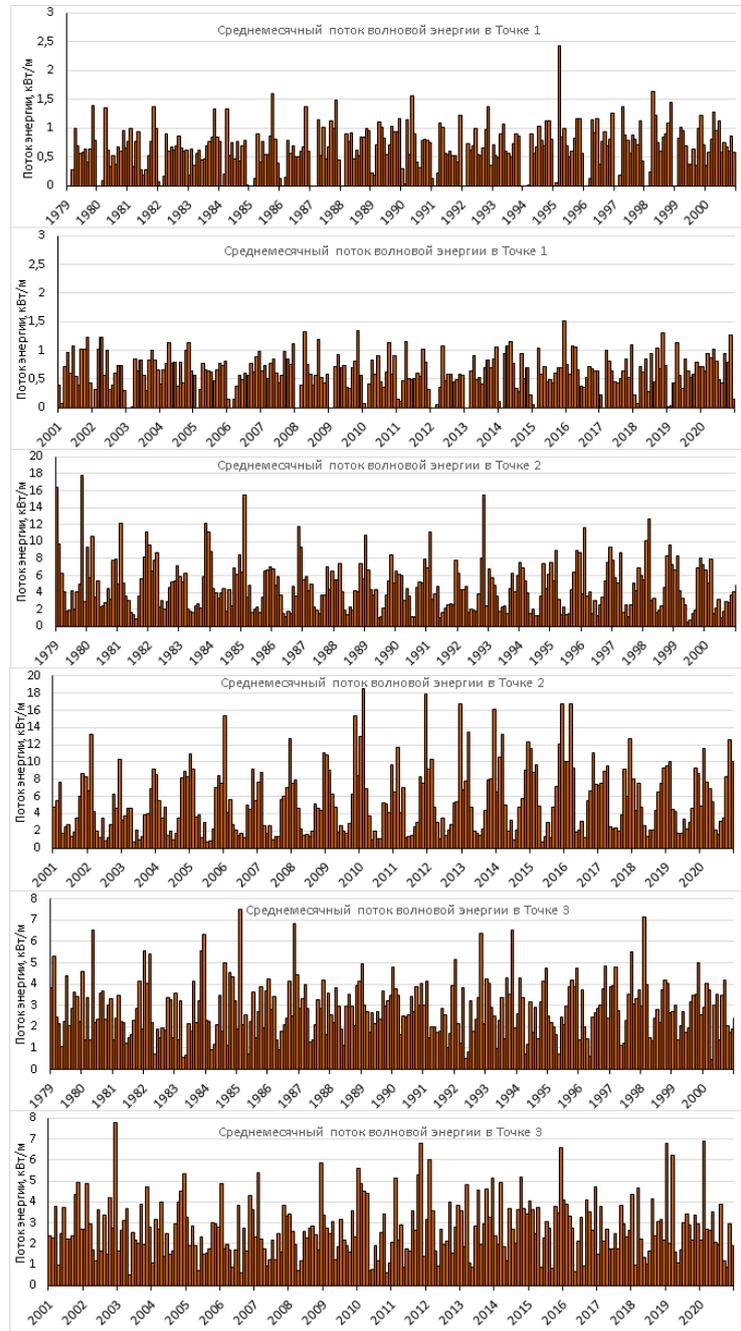


Рис. 4. Среднемесячный поток волновой энергии (кВт/м волнового фронта) в Каспийском море за период 1979–2017 в трех точках.

4 Заключение

На основе модели WaveWatch3 и данных реанализа NCEP/CFRS получены данные о потоке волновой энергии за период с 1979 по 2020 год с высоким пространственным разрешением. Полученный массив данных был использован для расчета среднемноголетних показателей потока волновой энергии, и оценки его сезонной и межгодовой изменчивости.

Максимальные значения волновой энергии наблюдаются в центральной части Каспийского моря. В зимние месяцы в средней и южной частях моря наблюдается увеличение потока энергии.

Обеспеченность волновой энергией для критерия 1 кВт/м волнового фронта в центральной части Каспийского моря составляет 50-55%, в южной части – 30-45%. В южной части моря обеспеченность существенно уменьшается в прибрежной зоне.

Сезонная изменчивость потока энергии очень велика. Для средней части моря в летние месяцы поток энергии составляет 2-5 кВт/м, а в зимние увеличивается до 7-10 кВт/м волнового фронта.

В целом Каспийское море имеет не очень большой потенциал волновой энергии по сравнению, например, с Баренцевым [8] и даже с Балтийским [9] морями. Однако, в районе Апшеронского полуострова изолинии 50% обеспеченности энергией 1 кВт/м подходит достаточно близко к берегу, что является хорошим показателем.

Благодарность

Моделирование волнения выполнено Мысленковым С.А. при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Литература

1. Архипкин В.С., Васьков А.Г., Киселева С.В., Мысленков С.А., Темеев А.А., Темеев С.А., Умнов П.М. Оценка потенциала волновой энергии прибрежной акватории полуострова Крым // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 20. С. 25-35.
2. Горлов А.А. Научная и экспериментальная инфраструктура развития морских ВИЭ // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 4. С. 21-31.

3. Киселева С.В., Шестакова А.А., Торопов П.А., Мысленков С.А. Оценка ветроэнергетического потенциала Черноморского побережья Кавказа с использованием реанализа CFSR // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15-18. С. 75-85.
4. Кислов А.В., Суркова Г.В., Архипкин В.С. Повторяемость штормовых ситуаций в Балтийском, Черном и Каспийском морях в изменяющихся климатических условиях // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 67-77.
5. Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 12-21.
6. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Изд-во Беллона, 2007.
7. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Маркина М.Ю., Киселева С.В., Архипкин В.С., Горлов А.А., Умнов П.М. Сезонная и межгодовая изменчивость потока волновой энергии в Баренцевом море // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 19-21 (231-233). С. 36-48.
8. Мысленков С.А., Маркина М.Ю., Киселева С.В. и др. Исследование ресурсов энергии волн в акватории Баренцева моря // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 5-15.
9. Мысленков С.А., Медведева А.Ю. Оценка ресурсов волновой энергии Балтийского моря и прибрежной зоны Калининградской области // Фундаментальная и прикладная геофизика. - 2019. - Т. 12 - С. 34-42
10. Мысленков С. А., Архипкин В. С., Павлова А. В., Добролюбов С. А. Волновой климат Каспийского моря по данным моделирования // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 60-70.
11. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 С.
12. Alamian R., R. Shafaghat, S.S. Hosseini, A. Zainali Wave energy potential along the southern coast of the Caspian Sea Int. J. Mar. Energy., 19 (2017), pp. 221-234, 10.1016/j.ijome.2017.08.002
13. Gholamreza Amirinia, Bahareh Kamranzad, Somayeh Mafi, Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis // Energy, Volume 120, P. 332-345, 2017.
14. Golshani A. A., A. Nakhaei, S. Taebi, V. Chegini, and A. V. Jandaghi, "Wave Hindcast Study of the Caspian Sea," J. Mar. Eng., No. 2, 1 (2005).
15. Kudryavtseva N, Kussembayeva K, Rakisheva ZB, Soomere T (2019) Spatial variations in the Caspian Sea wave climate in 2002–2013 from satellite altimetry. Estonian J Earth Sci 68(4):225–240. <https://doi.org/10.3176/earth.2019.16>
16. Tolman H (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333.
17. Rusu E, Onea F, Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea, Energy (2013), [http:// dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044](http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044)

References

1. Arhipkin V.S., Vas'kov A.G., Kiseleva S.V., Myslenkov S.A., Temeev A.A., Temeev S.A., Umnov P.M. Ocenka potenciala volnovej energii pribrezhnoj akvatorii polu-ostrova Krym

- // *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i eko-logiya*. 2015. № 20. S. 25-35.
2. Gorlov A.A. Nauchnaya i eksperimental'naya infrastruktura razvitiya morskikh VIE // *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2017. № 4. S. 21-31.
 3. Kiseleva S.V., SHestakova A.A., Toropov P.A., Myslenkov S.A. Ocenka vetroenergeticheskogo potentsiala Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza s ispol'zovaniem reanaliza CFSR // *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2016. № 15-18. S. 75-85.
 4. Kislov A.V., Surkova G.V., Arhipkin V.S. Povtoryaemost' shtormovykh situatsiy v Baltijskom, Chernom i Kaspijskom moryah v izmenyayushchih klimaticheskikh usloviyah // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016. № 2. S. 67-77.
 5. Lopatuhin L.I., Yaickaya N.A. Volnovej klimat Kaspijskogo morya. Vhodnye dannye po vetru dlya gidrodinamicheskogo modelirovaniya i nekotorye rezul'taty raschetov // *Okeanologiya*. 2019. T. 59. № 1. S. 12-21.
 6. Minin V. A., Dmitriev G. S. Perspektivy osvoeniya netraditsionnykh i vobnovlyemykh istochnikov energii na Kol'skom poluostrove. Murmansk: Izd-vo Bellona, 2007.
 7. Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Markina M.YU., Kiseleva S.V., Arhipkin V.S., Gorlov A.A., Umnov P.M. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' potoka volnovej energii v Barentsevom more // *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2017. № 19-21 (231-233). S. 36-48.
 8. Myslenkov S.A., Markina M.YU., Kiseleva S.V. i dr. Issledovanie resursov energii voln v akvatorii Barentseva morya // *Teploenergetika*. 2018. № 7. S. 5-15.
 9. Myslenkov S.A., Medvedeva A.YU. Ocenka resursov volnovej energii Baltijskogo morya i pribrezhnoj zony Kaliningradskoj oblasti // *Fundamental'naya i prikladnaya geofizika*. - 2019. - T. 12 - S. 34-42
 10. Myslenkov S. A., Arhipkin V. S., Pavlova A. V., Dobrolyubov S. A. Volnovej klimat Kaspijskogo morya po dannym modelirovaniya // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2018. № 10. S. 60-70.
 11. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Ohotskogo i Kaspijskogo morej. SPb.: Rossijskij morskoy registr sudohodstva, 2003. 213 S.
 12. Alamian R., R. Shafaghat, S.S. Hosseini, A. Zainali Wave energy potential along the southern coast of the Caspian Sea Int. J. Mar. Energy., 19 (2017), pp. 221-234, 10.1016/j.ijome.2017.08.002
 13. Gholamreza Amirinia, Bahareh Kamranzad, Somayeh Mafi, Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis // *Energy*, Volume 120, P. 332-345, 2017.
 14. Golshani A. A., A. Nakhaei, S. Taebi, V. Chegini, and A. V. Jandaghi, "Wave Hindcast Study of the Caspian Sea," J. Mar. Eng., No. 2, 1 (2005).
 15. Kudryavtseva N, Kussembayeva K, Rakisheva ZB, Soomere T (2019) Spatial variations in the Caspian Sea wave climate in 2002–2013 from satellite altimetry. *Estonian J Earth Sci* 68(4):225–240. <https://doi.org/10.3176/earth.2019.16>
 16. Tolman H (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333.
 17. Rusu E, Onea F, Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea, *Energy* (2013), [http:// dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044](http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044)

The Wave Energy Flux Analysis in the Caspian Sea

Stanislav Myslenkov^{1,2}

Sophia Kiseleva^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: stasoccean@gmail.com, ³E-mail: k_sophia_v@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the wave energy in the Caspian Sea analysis for the period from 1979 to 2020. Wave energy calculations were performed using the WAVEWATCH III wave model on an irregular grid with a step of up to 900 m in the coastal zone. Results are obtained on the spatial variability of the wave energy flux and its seasonal variability. The maximum values of the energy flux are about 5 kW/m of the wave front and appear in the central part of the Caspian Sea. Availability of wave energy of 1 kW/m in the central part of the Caspian Sea is 50-55%, in the northern part – no more than 20%, and in the southern part – 30-45%. The seasonal variability of the energy flux analysis for three points located in different parts of the sea has been carried out. Seasonal changes in the energy flow are most pronounced in the central part of the sea: in the summer months, the energy flow is 2-5 kW/m, and in winter it increases to 7-10 kW/m. The maximum average monthly flow of wave energy was 18.5 kW/m of the wave front.

Keywords: Caspian Sea, wave energy, wave simulation, WAVEWATCH III.

Acknowledgment

The simulation of excitement was carried out by Myslenkov S.A. with the support of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University "The future of the planet and global environmental changes".

Геоинформационные системы в биоэнергетике

Рафикова Юлия Юрьевна^{[0000-0003-3204-9135]1,2}

Андреев Татьяна Ивановна^{[0000-0001-8678-3568]1,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail:ju.rafikova@mail.ru,³E-mail:tanyandr00@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена использованию методов геоинформационного анализа пространственных данных для целей биоэнергетики. Описываются основные методы и тенденции развития этого направления за последние 50 лет. Проведен обзор международной и отечественной практики исследований в этой области. Представлены и систематизированы различные методики картографирования ресурсов биоэнергетики, а также инструментарий, решающий задачи поиска оптимальных мест для размещения объектов энергетики на ресурсах биомассы. Описана специфика пространственных данных, используемых в решении задач биоэнергетической отрасли и особенности работы с ними в среде геоинформационных систем (ГИС).

Ключевые слова: биоэнергетика, методы картографирования, геоинформационные системы, ресурсы, базы геоданных.

1 Введение

Картографирование ресурсов биоэнергетики является одним из направлений картографирования ресурсов возобновляемых источников энергии, активно развивающимся в мире параллельно с развитием и распространением методов получения тепловой и электрической энергии, а также биотоплив различного типа из биомассы. На протяжении последних десятилетий в мире были созданы ряд геоинформационных систем (ГИС) по биоэнергетике: Интерактивная карта ресурсов биомассы Канады, Атлас ресурсов биомассы Новой Зеландии, Балтийская сеть по биомассе [1], Глобальный атлас возобновляемой энергии Международного агентства по возобновляемой энергетике и др.

Россия для развития биоэнергетической отрасли, как и многие страны мира, обладает значительной ресурсной базой. В нашей стране основным сырьем био-

энергетики являются все виды веществ растительного и животного происхождения, продукты жизнедеятельности различных организмов и органические отходы, образующиеся в процессах производства, потребления продукции и на этапах технологического цикла. На основе этого можно выделить основные категории биомассы:

- отходы растениеводства (лузга, шелуха, солома, тростник и т. д.), животноводства, лесопромышленного комплекса (ЛПК);
- бытовые отходы, канализационные стоки и др.;
- сельскохозяйственные культуры (в том числе специально выращиваемые для получения биотоплива);
- древесная биомасса.

2 Методы геоинформационного анализа для биоэнергетики

В связи с этим становится актуальным развитие методов геоинформационного анализа потенциала биоэнергетики в национальном и региональном масштабе. Геоинформационные технологии способны решить следующие задачи биоэнергетической отрасли:

1. Оценка ресурсного потенциала биомассы и его распределения по территории.
2. Учет широкого спектра критериев, ограничивающих реализацию проектов биоэнергетики на выбранных территориях.
3. Оценка концентрации научно-технологического потенциала.
4. Оценка наличия опыта реализации биоэнергетических проектов

В международных и отечественных исследованиях накоплен значительный опыт в решении этих задач, который важно систематизировать с целью определения наиболее эффективных методов картографирования и актуальных направлений дальнейших исследований.

Картографирование ресурсов биоэнергетики, в целом, отличается от такового для солнечных и ветровых ресурсов в силу специфики исходных пространственных данных, на которых основывается решение задач. Наиболее распространенный в мире вид геоинформационных ресурсов по биоэнергетике (атласы, ГИС и др.) - это **ресурсные ГИС** с привязкой данных к административным единицам (площадным объектам). Такая форма отображения данных характерна для стран с развивающейся отраслью биоэнергетики, где пока не накоплен (или не находится в открытом доступе) объем информации о существующих объектах биоэнергетики, их выработке и т.п. ГИС этого типа, как правило, основываются на государственных статистических данных по валовым сборам культур различного

типа, а также отходам биомассы различных отраслей. Факт использования официальной государственной статистики обосновывает достоверность получаемых картографических продуктов для целей национальных и региональных оценок. Ресурсные ГИС по биоэнергетике успешно применяются в решении стратегических задач - определения энергетической стратегии регионов, поиска новых рынков и т.п.

Ресурсные ГИС площадного типа традиционно включают в себя следующие виды данных:

- 1) валовый энергетический потенциал, выраженный в тоннах условного топлива (рис. 1);
- 2) технический потенциал, выраженный в энергетических единицах соответствующего вида энергии;
- 3) также на картах данного типа могут быть отражены данные о потреблении энергии по административным единицам карты, взятые из официальных источников или рассчитанные на основе данных о численности населения и потреблению энергии на душу населения.

4)

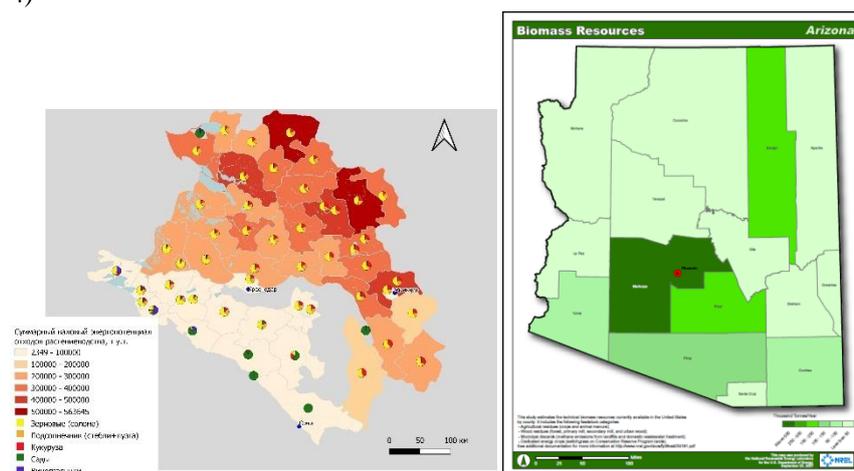


Рис. 1. Пример карт валового энергетического потенциала отходов растениеводства Краснодарского края (слева, составлена авторами) и штата Аризона, США (справа, источник – Атлас возобновляемой энергии США [2]).

Ресурсные ГИС с локализованными данными характерны для стран, где уже есть опыт развития проектов в области биоэнергетики. Данные в таких информационных системах привязаны к источникам отходов – производственным предприятиям, предприятиям по переработке сырья (рис. 2). Слои интерактивных карт могут делиться по видам отходов. Атрибутивные таблицы содержат в

себе информацию об объёмах, качестве, весе, стоимости отходов, распределенные по временным диапазонам (по сезонам, месяцам и т.п.). Инструментарий данного вида ГИС позволяет производить экономические, логистические, экологические оценки.

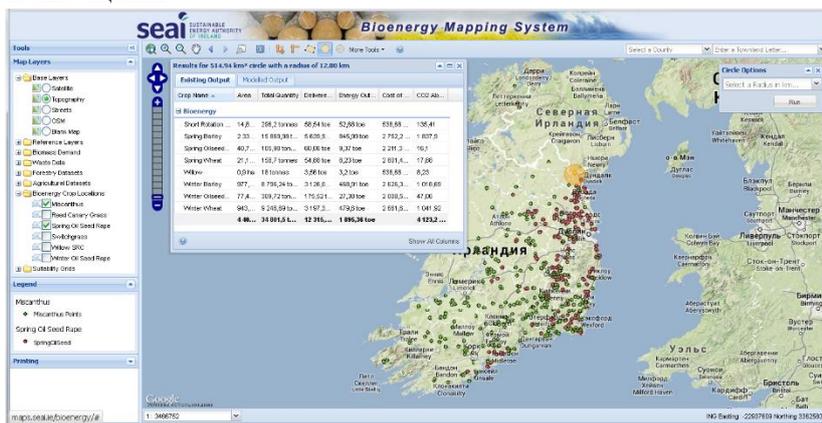


Рис. 2. ГИС биоэнергетики Ирландии [3].

Особого внимания заслуживает опыт создания синтетических карт, объединяющих в себе площадные и точечные объекты. Например, в «Интерактивной ГИС планирования и поддержки объектов биоэнергетики Белоруссии» [4] картографические слои включали в себя: слой котельных, слой лесных ресурсов, слой деревоперерабатывающих предприятия, слой структуры лесосечного фонда, а также другие инфраструктурные и экологические слои, позволяющие анализировать транспортные затраты, экологические нагрузки, делать предварительное заключение о целесообразности перевода на древесное топливо того или иного объекта (рис. 3).

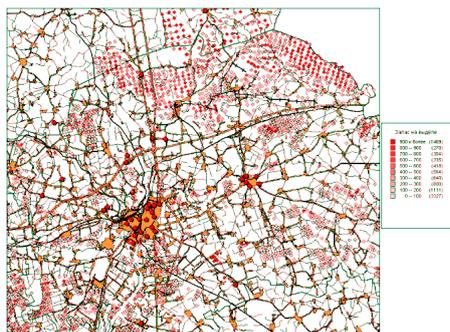


Рис. 3. Фрагмент карты распределения количества древесных отходов (центры лесных кварталов) и котельных мощностью более 0,5МВт.[4]

3 Геинформационный анализ в биоэнергетике на региональном уровне

Развитие методов геоинформационного анализа для оптимизации территориальных схем переработки органических отходов на региональном уровне в последние десятилетия стали актуальным направлением исследований [5,6,7, 8]. В работах этой направленности учитываются пространственное распределение ресурсов, экологические и технические аспекты. Результатом такого анализа становятся оптимальные территории для размещения объектов биоэнергетики (рис. 4).

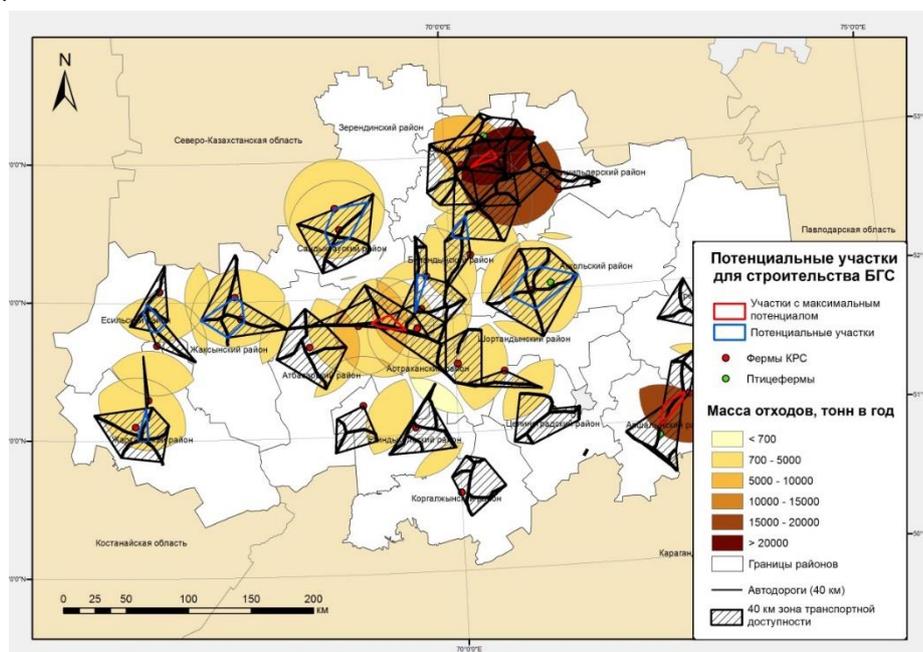


Рис. 4. Результаты выбора наиболее оптимальных участков территории Акмолинской области для строительства биогазовых станций (БГС) на отходах животноводства и растениеводства. [8]

В последние 5 лет в использовании методов ГИС для целей возобновляемой энергетики наметилась тенденция к поиску комплексных интегральных показателей, привязанных к пространственной сетке определенного разрешения. Это связано с необходимостью учёта в анализе ресурсов ВИЭ большого количества разнородных пространственных факторов, которые составляют собой в проектах

национального и регионального масштаба объёмы информации, измеряемой в терабайтах, работа с которой становится затруднительной в геоинформационной среде. Для решения этой проблемы разрабатываются модели, позволяющие представить потенциал территории как комплекс факторов, привязанных к ячейке (рис. 5). ГИС-инструментарий при этом позволяет задавать внутри ячеек разнообразные сценарии – в зависимости от изменения политики региона, стоимости энергии и т.п.

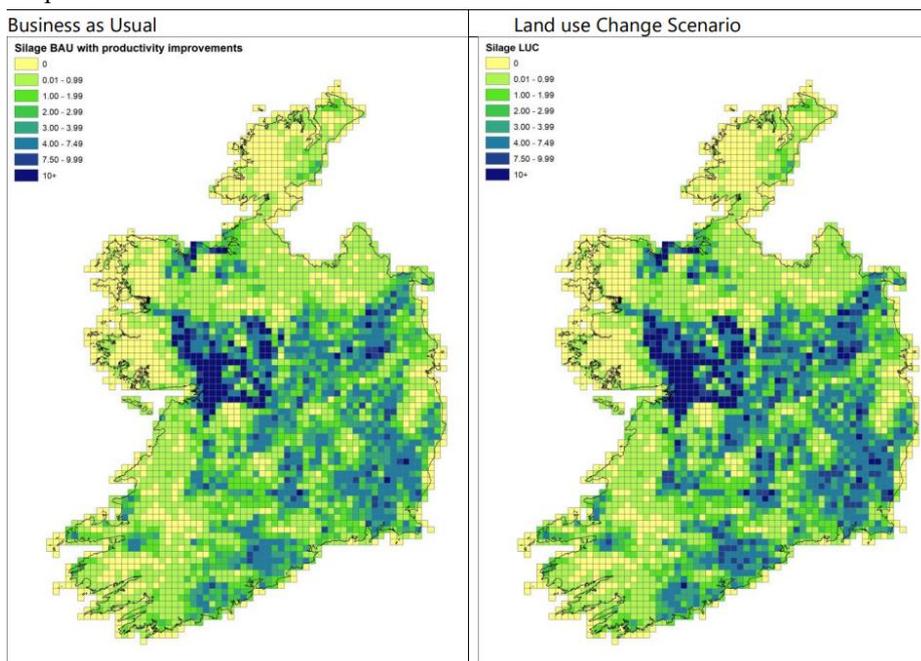


Рис. 5. Пример карты биоэнергетического потенциала Ирландии с учетом различных сценариев развития использования территорий[9]

Наиболее актуальным направлением исследований на сегодняшний день является разработка инструментов геоинформационного моделирования возможности использования ресурсов биоэнергетики. Примером является инструмент «Биоэнергетический симулятор» (BioenergySimulator), созданный в рамках проекта Глобального атласа возобновляемой энергетики Международного агентства по возобновляемой энергетике (IRENA) [10]. Инструмент позволяет для выбранной пользователем территории земного шара определять возможную выработку тепловой, электрической энергии или топлив различных типов в зависимости от заданного типа ресурса (отходы или специально выращенные культуры). При этом в модели учитываются географические и климатические особенности тер-

ритории (рис. 6). Также в симуляторе представлена возможность выбора технологии переработки исходного ресурса в энергетический продукт – это может существенно влиять на стоимость и энергетическую ценность.

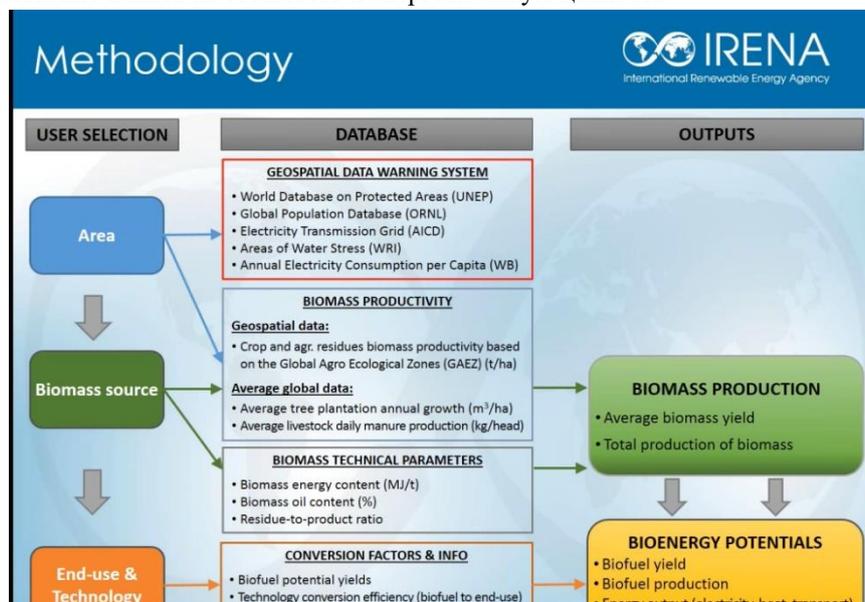


Рис. 6. Алгоритм геоинформационного инструмента BioenergySimulator Глобального атласа IRENA [10]

Несмотря на значительный мировой опыт в развитии ГИС для целей биоэнергетики, пока еще остаются нерешенными задачи геоинформационного моделирования и визуализации следующих типов пространственной информации:

- ресурсов смешанного типа (возможности использования в энергетических целях различных видов отходов биомассы совместно);
- учёт энергетических потерь в сетях при переработке отходов биомассы в энергетические продукты;
- учёт социального-экономического и экологического эффекта от использования отходов биомассы или специального выращивания сельскохозяйственных культур в энергетических целях.

4 Заключение

В настоящее время в решении задач биоэнергетики во многих странах мира и в России наиболее востребован детальный мультикритериальный анализ территорий средствами ГИС, учитывающий ресурсные, инфраструктурные, эконо-

мические, экологические факторы. В связи с проблемами накопления органических отходов в РФ, декларацией государственных целей в области утилизации отходов производства и потребления, наиболее актуальным для нашей страны представляется разработка методов оптимизации размещения объектов переработки органических отходов с получением энергии, а также анализ средствами ГИС потенциальных потребителей такой энергии и комплекса социально-экономических факторов, оказывающих влияние на перспективы использования отходов биомассы в энергетических целях в региональном масштабе.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-010-00981).

Литература

1. Официальный сайт проекта «Балтийская сеть по биомассе». Электронный ресурс. Режим доступа: <https://balticbiomass4value.eu/biomass-resources-data/>. Дата обращения: 15.06.2022
2. Официальный сайт Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике США. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/gis/>. Дата обращения: 15.06.2022
3. Геоинформационная система биоэнергетики Ирландии. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.seai.ie/technologies/seai-maps/bioenergy-map/>. Дата обращения: 15.06.2022
4. Применение биомассы для отопления и горячего водоснабжения в Республике Беларусь. Проект ПРООН ГЭФ. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://energoeffect.gov.by/bioenergy/htdocs/seminari.htm>. Дата обращения: 15.06.2022
5. Dagnall S, Hill J, Pegg D. Resource mapping and analysis of farm livestock manures—assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. *Bioresource Technology* 2000;71:225–34
6. BatziasFA, SidirasDK, SpyrouEK. Evaluating livestock manures for biogas next term production: a GIS based method. *Renewable Energy* 2004;30:1161–76
7. GomezA, ZubizarretaJ, RodriguesM, DopazoC, FueyoN. Anestimationoftheenergypotentialnexttermofagro-industrialresiduesinSpain. *Resources, Conservation and Recycling* 2010;54(11):972–84
8. Тулегенова А. А., Киселева С. В. Использование методов пространственного анализа для оценки потенциала производства энергии при помощи биогазовых станций // Проблемы региональной экологии. — 2018. — № 6. — С. 73–77
9. SustainableBioenergyforHeat. Spatial Assessment of Resources and Evaluation of Costs and Greenhouse Gas Impacts. Report 7 of the National Heat Study, February 2022, V1.0, Sustainable Energy Authority of Ireland. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.seai.ie/publications/Sustainable-Bioenergy-for-Heat.pdf>. Дата обращения: 15.06.2022

10. Bioenergy Simulator. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.irena.org/renewables/Knowledge-Gateway/webinars/2017/Jul/Launch-Webinar-for-the-IRENA-Global-Atlas---Bioenergy-Simulator>. Дата обращения: 15.06.2022

References

1. Official website of the Baltic Biomass Network project. Electronic resource. Access mode: <https://balticbiomass4value.eu/biomass-resources-data/>. Date of access: 06/15/2022
2. Official website of the US National Renewable Energy Laboratory. Electronic resource. Access mode: <https://www.nrel.gov/gis/>. Date of access: 06/15/2022
3. Bioenergy Geographic Information System of Ireland. Electronic resource. Access Mode: <https://www.seai.ie/technologies/seai-maps/bioenergy-map/>. Date of access: 06/15/2022
4. Application of biomass for heating and hot water supply in the Republic of Belarus. UNDP GEF project. Electronic resource. Access mode: <https://energoeffect.gov.by/bioenergy/hdocs/seminari.htm>. Date of access: 15.06.2022
5. Dagnall S, Hill J, Pegg D. Resource mapping and analysis of farm livestock manures—assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. *Bioresource Technology* 2000;71:225–34
6. Batzias FA, Sidiropoulos DK, Spyrou EK. Evaluating livestock manures for biogas next term production: a GIS based method. *Renewable Energy* 2004;30:1161–76
7. Gomez A, Zubizarreta J, Rodrigues M, Dopazo C, Fueyo N. A estimation of the energy potential next term of agro-industrial residues in Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 2010;54(11):972–84
8. Tulegenova A. A., Kiseleva S. V. Ispol'zovaniye metodov prostranstvennogo analizadlya otsenki potentsiala proizvodstva energii pri pomoshchi biogazovykh stan-tsiy // Problemy regional'noy ekologii. — 2018. — № 6. — S. 73–77. In Russian
9. Sustainable Bioenergy for Heat. Spatial Assessment of Resources and Evaluation of Costs and Greenhouse Gas Impacts. Report 7 of the National Heat Study, February 2022, V1.0, Sustainable Energy Authority of Ireland. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.seai.ie/publications/Sustainable-Bioenergy-for-Heat.pdf>. Дата обращения: 15.06.2022
10. Bioenergy Simulator. Electronic resource. Access Mode: <https://www.irena.org/renewables/Knowledge-Gateway/webinars/2017/Jul/Launch-Webinar-for-the-IRENA-Global-Atlas---Bioenergy-Simulator>. Date of access: 15.06.2022

Geoinformation systems in bioenergy

Julia Rafikova^{1,2}

Tatiana Andreenko^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: ju.rafikova@mail.ru, ³E-mail: tanyandr00@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the use of methods of geoinformatics for the purposes of bioenergy. The main methods and trends in the development of this scientific area over the past 50 years are described. A review of international and domestic practice of research in this area has been carried out. Various methods of mapping bioenergy resources are presented, as well as tools that solve the problem of finding optimal places for placing energy facilities on biomass resources. The specifics of spatial data used in solving the problems of the bioenergy industry and the features of working with them in the environment of geographic information systems (GIS) are described.

Keywords: bioenergy, mapping methods, geoinformation systems, resources, geodatabases

Acknowledgement. Work is executed at financial support RFBR (project #20-010-00981)

Особенности изменения меридионального градиента инсоляции в современную эпоху

Фёдоров Валерий Михайлович^{[0000-0003-2305-7408]1,2}

Фролов Денис Максимович^{[0000-0002-0307-8175]1,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail: fedorov.msu@mail.ru,

³E-mail: frolov@geogr.msu.ru

Аннотация. На основе выполненных расчетов облучения Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. определены пространственные особенности многолетних изменений меридионального градиента инсоляции. Определены широтные зоны локализации экстремумов в изменении годового и сезонного (летнего) меридионального градиента инсоляции, совпадающие с областями генерации тропических и максимального развития внетропических атмосферных вихрей – циклонов. Показано, что средний годовой перенос энергии в системе океан – атмосфера определяется средним годовым меридиональным градиентом инсоляции на верхней границе атмосферы. Показано, что изменение годового и сезонного меридионального градиента инсоляции регулируется изменением наклона оси вращения Земли.

Ключевые слова: инсоляция, меридиональный градиент инсоляции, зоны «неустойчивости», тропические и внетропические циклоны.

1 Введение

Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный и тепловой баланс Земли. С широтными особенностями распределения солнечной радиации связано расположение климатических поясов (широтная зональность). В древности Гиппархом (древнегреческий астроном, географ и математик II-го века до нашей эры) было дано объяснение годовой смене климатических сезонов. Эта смена объяснялась изменением наклона падения солнечных лучей, связанным с орбитальным движением Земли и наклоном оси ее вращения («климат» в переводе с греческого языка означает – «наклон»). В связи с этим расчеты инсоляции с высоким пространственным и временным разреше-

нием и анализ результатов расчета представляются актуальными для определения роли радиационного фактора в сезонных, межгодовых и многолетних изменениях глобального климата.

В регулировании поступления солнечной радиации к Земле (без учета атмосферы) и распределения ее по земной поверхности (солярный климат Земли) выделяются два механизма, имеющие различную физическую природу. Один механизм связан с изменением активности Солнца [1]. Другой механизм определяется небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты (расстояние Земля – Солнце, продолжительность тропического года и др.), наклон оси вращения и связанные с ними изменения в инсоляции Земли [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. В перераспределении тепла в природной системе Земли участвуют механизмы меридионального переноса тепла, теплообмена в системе океан – материк, связанного с реверсивной сезонной сменой областей холода и тепла, теплообмена в системе океан – атмосфера, межполушарный теплообмен и др. Важным фактором в регулировании термического режима Земли является состав атмосферы, определяющий роль парникового эффекта и ее изменение [10].

В XX веке отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана [11]. Широко распространено мнение о том, что основной причиной изменения глобального климата является «парниковый» эффект, связанный, главным образом, с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором [12]http://www.wmo.int/pages/index_ru.html. В то же время, не подвергается сомнению то, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата и в развитии жизни на Земле, однако этот вопрос в геофизике исследован еще недостаточно.

Вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами, определяются расчетными методами. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли без учета атмосферы [2, 13].

2 Методика расчётов

Инсоляция Земли рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид DE-406 [14] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (координатного времени – СТ) и всемирного корректируемого времени (UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей равными 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt, \quad (1)$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (m^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; $\Lambda(\varphi, t, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($Вт/м^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1° , по широте 1° , по времени $1/360$ часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2 [15]. Изменение активности Солнца не учитывалось. Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли солнечной энергии изложена в [9].

3 Полученные результаты и их обсуждение

Анализировались, полученные в результате расчетов [16] среднегодовые значения инсоляции в 5-ти градусных широтных зонах для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. (рис. 1).

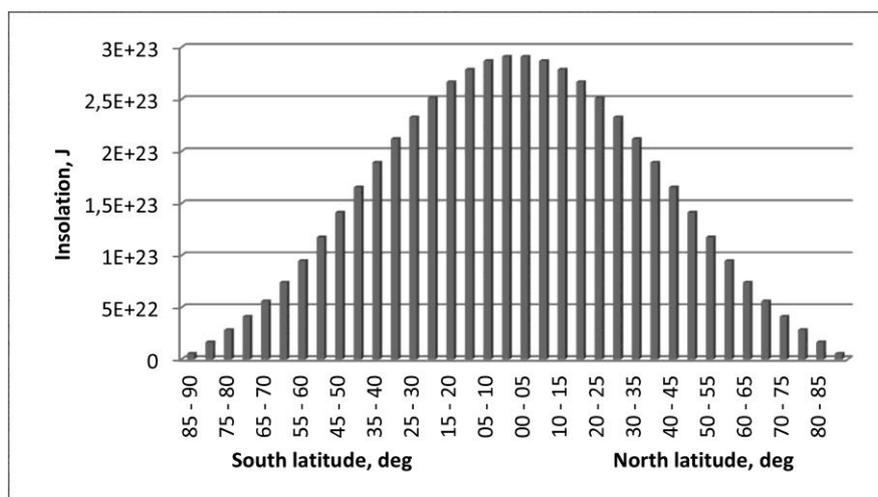


Рис. 1. Средняя многолетняя за период от 3000 г. до н.э. до 2999 г. годовая инсоляция на ВГА в широтных зонах Земли

В связи с неравномерностью облучения Земли возникает, связанный с формой Земли, меридиональный градиент инсоляции (МГИ) [17, 18, 19]. МГИ рассчитывался последовательным вычитанием среднегодовых значений годовой (или полугодовой) инсоляции полученных для 5-ти градусных широтных зон. При этом

из значений инсоляции южных зон вычитались значения соседних зон, расположенных севернее. Делением полученных значений (в Дж) на среднюю продолжительность тропического года (31556921,5 с) получены значения среднего многолетнего за период от 3000 г. до н.э. до 2999 г. годового МГИ в Вт (рис. 2).

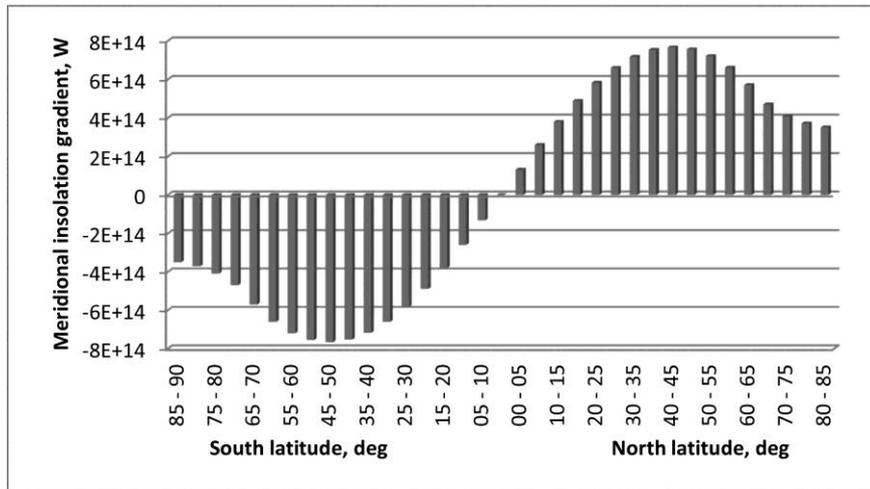


Рис. 2. Средний многолетний за период от 3000 года до н.э. по 2999 года н.э. годовой МГИ

Вычитанием из модулей средних значений годового МГИ, полученных для последнего в массиве столетия (2900 – 2999 гг.) соответствующих (для широтных зон) модулей средних значений МГИ, рассчитанных для первого столетия (3000 г. до н. э. – 2901 г. до н.э.) получено изменение годового МГИ за 5999 лет (рис. 3). Модули МГИ определялись для того, чтобы изменение в переносе лучистой энергии на ВГА было однозначно представлено в полушариях. В традиционном представлении рассчитывается перенос энергии к северу и в северном полушарии он имеет положительные значения, в южном полушарии отрицательные [20, 21]. Однако, фактически радиационное тепло переносится из области низких широт в районы, расположенные в более высоких широтах. Лучистая энергия переносится из экваториальной области (0°–45° широты), куда ее поступает больше в полярные районы (45°–90° широты), где годовая инсоляция меньше. МГИ представляет собой характеристику переноса (посредством излучения) лучистой энергии или радиационного тепла на ВГА.

Делением полученных значений изменения МГИ на соответствующие для широтных зон средние для первого столетия (от 3000 года до н.э. до 2901 года до н.э.) значения годового МГИ определялось изменение годового МГИ на ВГА в процентах (рис. 4).

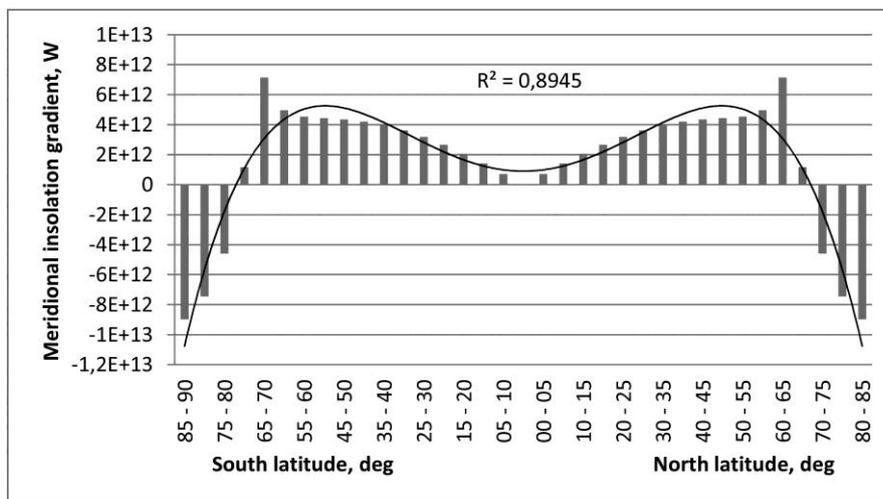


Рис. 3. Изменение годового МГИ за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э., Вт (аппроксимация – полином 4-й степени).

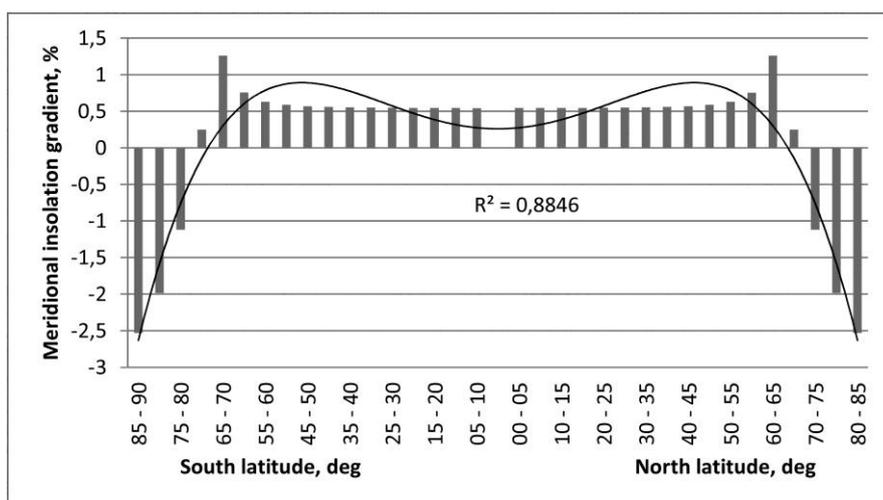


Рис. 4. Изменение годового МГИ за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э., % (аппроксимация – полином 4-й степени)

За период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. отмечается увеличение годового МГИ в области между полярными кругами. Максимумы увеличения (на $7,14E+12$ Вт или 1,26%) локализованы в северном полушарии в зоне 60° – 65° широты, в южном полушарии в зоне 65° – 70° широты (несимметричность связана с расчетом МГИ к северу). В заполярных областях годовой МГИ приблизительно от полярных кругов к полюсам сокращается. Максимумы сокращения МГИ (на $8,98E+12$

Вт или 2,53%) отмечаются вблизи географических полюсов. Таким образом, в каждом полушарии выделяются области увеличения (от экватора до полярного круга) и области уменьшения (от полярного круга до полюса) значений МГИ или переноса лучистой энергии. Известно, что перенос энергии в атмосфере связан с циркуляционными (ячейки Хэдли, Ферреля, полярные) и вихревыми процессами (циклоны) [20]. В широтном распределении изменений годового МГИ выделяются зоны «неустойчивости» (максимального увеличения МГИ), которые совпадают с районами (60° – 70° широты) максимального развития внетропических циклонов (циклогенеза) или субполярными зонами низкого давления в полушариях [20, 21, 22]. Область увеличения годового МГИ совпадает с пространственной локализацией циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля в каждом полушарии. Область сокращения годового МГИ совпадает с областью развития полярных ячеек. Следовательно, за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. годовая интенсивность общей циркуляции атмосферы (ОЦА) в ячейках Хэдли и Ферреля возрастает, а в полярных ячейках снижается.

Локализация отмеченных максимумов в изменении годового МГИ связана с уменьшением наклона оси вращения Земли. За 5999 лет угол наклона уменьшается от $24,02^{\circ}$ в 3000 г. до н.э. до $23,31^{\circ}$ в 2999 году. То есть, уменьшение составляет $0,72^{\circ}$ или 2,98% относительно 3000 г. до н.э. Также на 2,97% увеличивается меридиональная контрастность в облучении Земли [8, 13, 16]. Максимально (на 0,25% относительно первого столетия) облучение увеличивается в экваториальной области (в зонах 0° – 5° каждого полушария). Максимально инсоляция сокращается (на 2,72%) в полярных зонах (85° – 90° в каждом полушарии). Изменение инсоляции за 5999 лет в широтных зонах происходит неодинаково. Так при уменьшении наклона оси полярные круги смещаются в направлении географических полюсов и вместе с ними в зимние полугодия (максимально в периоды зимнего солнцестояния) облучению подвергаются области ранее расположенные за полярными кругами. Этим может объясняться пространственная локализация максимумов годового МГИ вблизи полярных кругов (в зоне 60° – 65° широты в северном полушарии и в зоне 65° – 70° широты в южном полушарии). Если принять длину дуги по меридиану соответствующую 1° равную 111 км, то смещение полярного круга составляет за 5999 лет около 80 км.

Аналогичным образом рассчитывалось изменение сезонного МГИ для зимнего и летнего (для северного полушария) полугодия (рис. 5, 6).

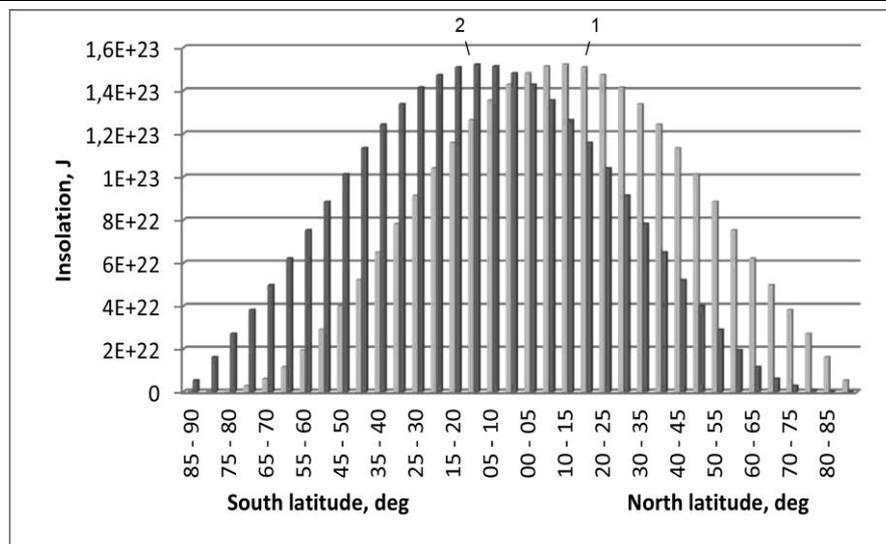


Рис. 5. Средняя многолетняя за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. инсоляция Земли в летнее (1) и зимнее (2) полугодие для северного полушария

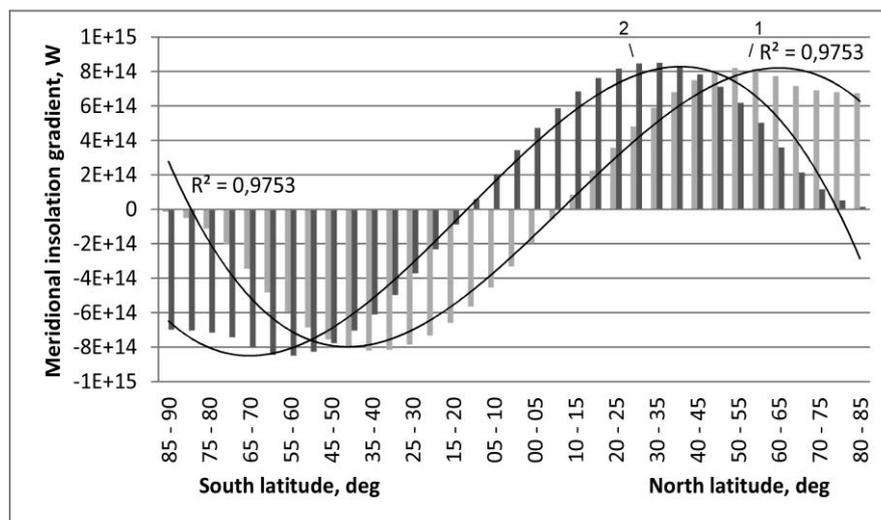


Рис. 6. Средний многолетний за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. сезонный МГИ в летнее (1) и зимнее (2) полугодие для северного полушария (аппроксимация – полиномы 4-й степени)

В летнее (для северного полушария) полугодие экстремумы МГИ локализируются в зоне 35°–40° ю.ш. ($-8,21E+14$ Вт) и 50°–55° с.ш. ($8,20E+14$ Вт). В зимнее (для северного полушария) полугодие экстремумы МГИ в зонах 55°–60° ю.ш. ($-8,50E+14$ Вт) и 30°–35° с.ш. ($8,51E+14$ Вт). локализируются вблизи 55-й параллели

в южном полушарии и вблизи 35-й параллели в северном полушарии. Смещение по широте экстремумов средних сезонных МГИ от полугодия к полугодью составляет, таким образом, около 20 градусов (рис. 6).

Изменение в переносе энергии по полугодиям находилось как разность полугодовых МГИ средних за последнее (2900 – 2999 гг.) и средние за первое (2900 г. до н. э. – 2999 г. до н.э.) столетие для соответствующих широтных зон (рис. 7).

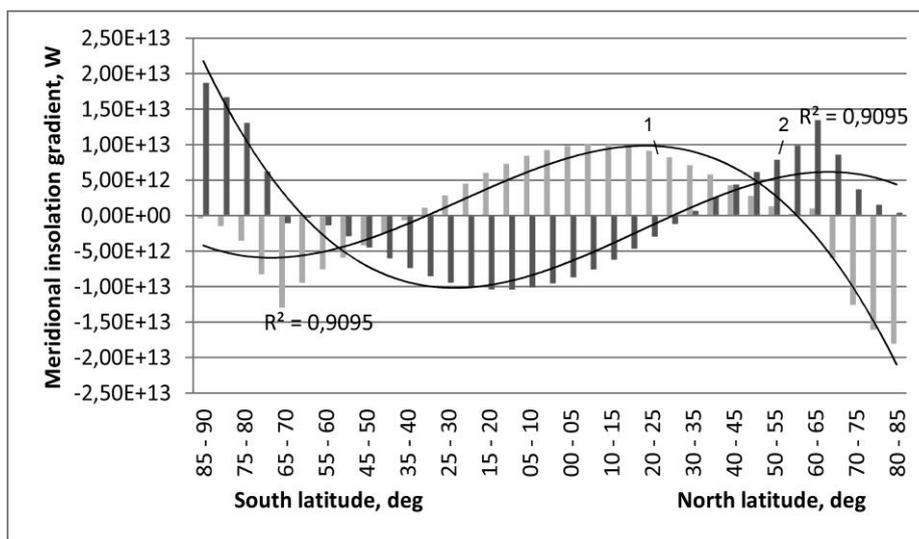


Рис. 7. Изменение средних многолетних за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. сезонных МГИ в летнее (1) и зимнее (2) для северного полушария полугодие, Вт (аппроксимация – полиномы 4-й степени).

В области от 30° с.ш. до 65° с.ш. отмечается увеличение, а в области от 35° ю.ш. до 70° ю.ш. сокращение сезонного МГИ в оба полугодия. В летнее (для северного полушария) полугодие МГИ сокращается в области от 35° ю.ш. до южного географического полюса и в области от 65° с.ш. до северного географического полюса. В широтной области от 35° ю.ш. до 65° с.ш. летний МГИ увеличивается. Максимум отмечается в широтном диапазоне 5°–15° с.ш. ($1,01E+13$ Вт). Максимумы сокращения МГИ характерны для широтных зон 65°–70° ю.ш. ($-1,30E+13$ Вт) и 85°–90° с.ш. ($-1,80E+13$ Вт). В зимнее (для северного полушария) полугодие сезонный МГИ увеличивается в диапазоне от 30° с.ш. до северного географического полюса и в диапазоне от 70° ю.ш. до южного географического полюса. В области от 70° ю.ш. до 30° с.ш. МГИ в зимнее полугодие сокращается. Максимальное сокращение МГИ в зимнее полугодие отмечается в широтном диапазоне 10°–20° ю.ш. ($1,04E+13$ Вт). Максимальное увеличение МГИ в это время характерно для широтных зон 85°–90° ю.ш. ($1,87E+13$ Вт) и 60°–65° с.ш. ($1,35E+13$ Вт).

В относительных единицах (в процентах от соответствующих средних для первого столетия значений) сезонный МГИ максимально увеличивается в летнее (для северного полушария) полугодие в зоне 10° – 15° с.ш. (на 12,52%) и максимально сокращается (на 16,33%) в соседней широтной зоне 5° – 10° с.ш. (рис. 8). В зимнее (для северного полушария) полугодие максимальное увеличение МГИ отмечается в широтной 15° – 20° ю.ш. (на 12,52%), а максимальное сокращение (на 16,33%) в соседней широтной зоне 10° – 15° ю.ш. Таким образом, в летнее в полушариях полугодие выделяются сезонные зоны «неустойчивости» расположенные в широтном диапазоне 5° – 15° с.ш. и 10° – 20° ю.ш. Здесь в соседних широтных зонах в летние для полушарий полугодия отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения МГИ размах изменения которого за 5999 лет составляет 28,85%. Несимметричность отмеченных для полушарий зон «неустойчивости» относительно экватора связана с расчетом МГИ к северу. В полярных ячейках ОЦА в летние полугодия отмечается сокращение МГИ, в зимние полугодия увеличение (максимально в зонах 65° – 70° ю.ш. и 60° – 65° с.ш.).

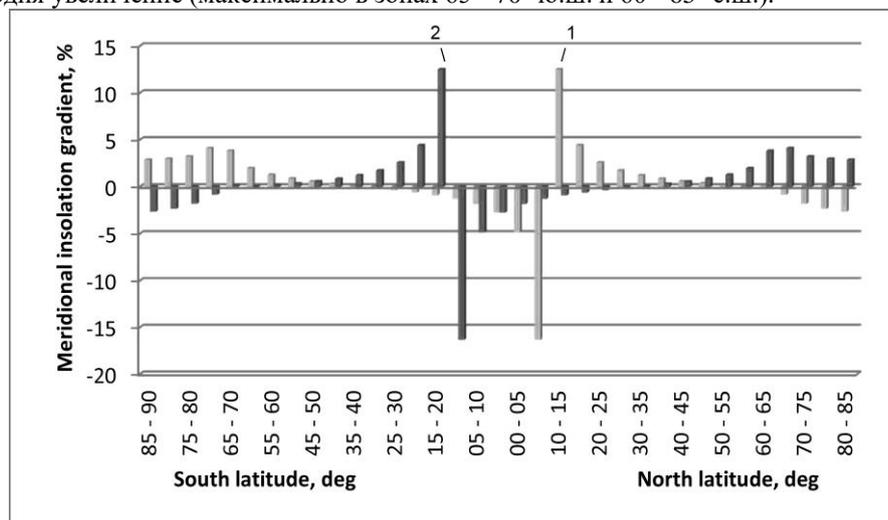


Рис. 8. Изменение средних многолетних сезонных МГИ за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. сезонных МГИ в летнее (1) и зимнее (2) для северного полушария полугодие, %

Локализация экстремумов в распределении летних МГИ так же связана с уменьшением наклона оси вращения Земли. В летние полугодия области максимального облучения, которые приходится на широтные зоны 10° – 15° в каждом полушарии (рис. 5), смещаются в направлении от экватора в более высокие широты (максимально в периоды солнцестояний). Поэтому облучение более низкоширотной относительно максимума и, примыкающей к нему зоны сокращается. Инсоляция примыкающей к максимуму более высокоширотной зоны увеличивается. Поэтому летний МГИ в северном полушарии уменьшается в широтной зоне

5°–10° и увеличивается в зоне 10°–15°. В южном полушарии инсоляция сокращается в зоне 10°–15° и увеличивается в зоне 15°–20° (не симметричность связана с расчетом МГИ к северу). В этих зонах в южном полушарии отмечаются абсолютный минимум и максимум МГИ соответственно.

Известно, что подавляющее большинство (90%) тропических циклонов формируется в пределах экваториального пояса между 5° и 20° широты в обоих полушариях. [23]. Области генерации тропических циклонов совпадают, таким образом, с сезонными (летними) зонами «неустойчивости». Эти зоны характеризуются максимальной дивергенцией в изменении летнего (в полушарии) МГИ. Тропические циклоны наносят человечеству огромный ущерб. Так, ущерб от урагана «Катрина» в 2005 г. составил более 100 млрд. долларов США, ущерб от ураганов «Харви» и «Ирма» в 2017 г. оценивается в 290 млрд. долларов. По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) за последние 50 лет тропические циклоны стали причиной 1942 бедствий, в результате которых погибли 779 324 человека и был причинен экономический ущерб в размере 1407,6 млрд. \$ США. В среднем за день это составляет 43 смертельных случая и 78 млн. \$ США [24]. Поэтому прогнозирование тенденций в их повторяемости и интенсивности имеет важное практическое значение.

Отмеченные нами области годовой и летней «неустойчивости» характеризуют разные стадии развития циклонических вихрей. Если с сезонными (летними) зонами «неустойчивости» связано зарождение тропических циклонов (в областях 5°–20° широты в каждом полушарии), то с годовыми зонами «неустойчивости» (в областях 60°–70° в каждом полушарии) связана стадия максимального развития внетропических циклонов [22]. С вихревым переносом энергии, в основном, связан меридиональный перенос радиационного тепла в атмосфере [20, 21]. Вихри (циклоны) переносят энергию из области источника тепла (из низких широт) в области его стока (в высокие широты). Ежегодно в северном полушарии насчитывается от 60 до 70 тропических циклонов, в южном полушарии (из-за большей однородности подстилающей поверхности) всего 5–10 [23].

Распределение средних для широтных зон за период от 3000 года до н.э. до 2999 значений годового МГИ сравнивалось с широтным распределением среднего годового переноса энергии в системе океан – атмосфера [20, 21]. При этом численные значения переноса энергии в системе океан – атмосфера в работах [20, 21] в среднем в 6–7 раз, превосходят значения МГИ, что связано с участием в переносе энергии в системе океан – атмосфера водных и воздушных масс (рис. 9). В других работах значения переноса энергии приблизительно в 3–5 раз превышают значения годового МГИ [25, 26]. Значение коэффициента корреляции между широтным распределением МГИ и распределением переноса энергии в системе океан – атмосфера изменяется от 0,981 [20, 25].

Коэффициент корреляции между значениями среднего годового МГИ и значениями переноса энергии в системе океан – атмосфера [20] составил 0,981. Связь между этими величинами выражается уравнением, которое приведено на рис. 10.

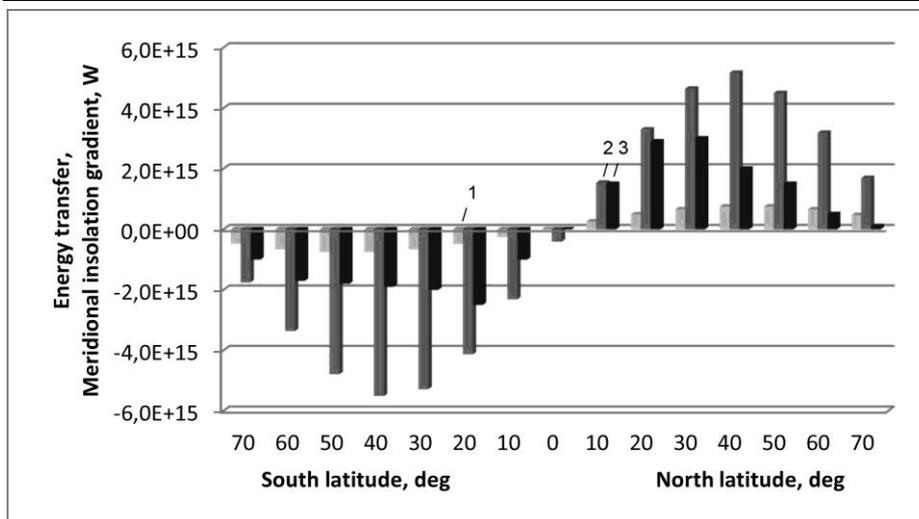


Рис. 9. Среднее многолетние значения МГИ (1) и среднегодовой перенос энергии в системе океан – атмосфера: 2 – по [20], 3 – по [25].

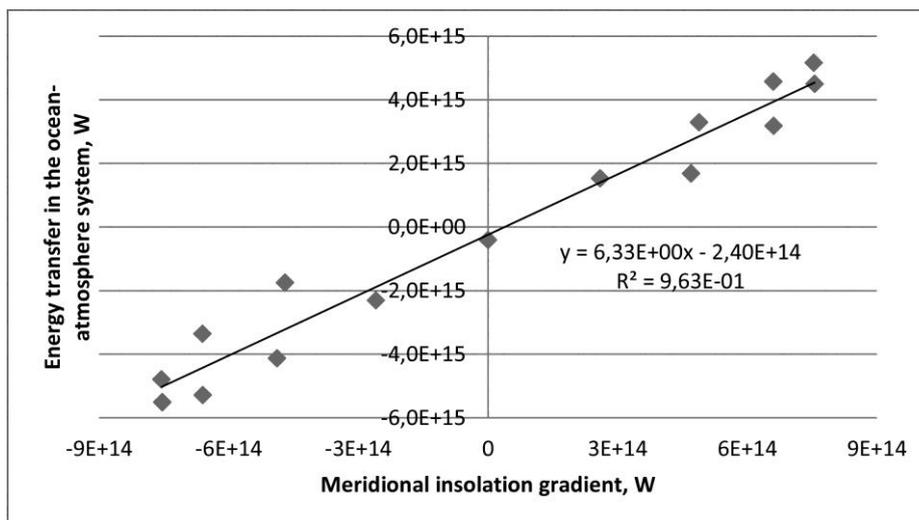


Рис. 10. График уравнения регрессии МГИ и переноса энергии (тепла) в системе океан – атмосфера

Поскольку перенос энергии в системе океан – атмосфера определяется МГИ (обратное невозможно), то полученные для него особенности могут проявляться в системе океан – атмосфера (возрастание или ослабление интенсивности циркуляции в ячейках общей циркуляции атмосферы, интенсивность меридионального

вихревого переноса энергии и климатической изменчивости). Отмечаемые для современной эпохи особенности изменения МГИ связаны с усилением меридиональной контрастности в инсоляции Земли. Усиление меридиональной контрастности определяются уменьшением наклона оси вращения Земли [2, 13, 16]. Из полученных результатов следует, что в связи с отмеченными особенностями изменения МГИ в будущем по-прежнему будет возрастать интенсивность вихревого переноса энергии в атмосфере (тропические и внетропические циклоны). То есть будет происходить усиление меридионального переноса радиационного тепла в системе океан – атмосфера. При этом усиление годового переноса энергии будет определяться внетропическими циклонами, а в летние для полушарий полугодия – тропическими циклонами (ураганы, тайфуны). В масштабе ОЦА отмечается увеличение годового МГИ в областях развития циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля и сокращение МГИ в полярных ячейках. В зимних полушариях отмечается увеличение сезонного МГИ в полярных ячейках, в летних полушариях сокращение. То есть, интенсивность процессов общей циркуляции в годовом масштабе будет возрастать в циркуляционных ячейках Хэдли и Ферреля и сокращаться в полярных ячейках. В зимние в полушариях полугодия интенсивность циркуляционных процессов в полярных ячейках будет возрастать, в летние полугодия уменьшаться.

Полученные изменения в переносе энергии на ВГА, вероятно, следует учитывать в системе уравнений гидротермодинамики (уравнения законов сохранения массы, импульса, энергии и состояния газа) для атмосферы используемой при численных экспериментах в физико-математических моделях климата. Используемые в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) и океана (МОЦО) уравнения гидротермодинамики включают среднее значение годового переноса энергии (тепла) в системе океан – атмосфера и не учитывают отмеченных нами изменений годового и сезонного МГИ [27].

4 Заключение

В изменениях годового МГИ за период от 3000 года до н.э. до 2999 года н.э. отмечается область увеличения, расположенная приблизительно между полярными кругами с максимумами (годовые зоны «неустойчивости») вблизи полярных кругов и области уменьшения, расположенные за полярными кругами. Максимумам увеличения годового МГИ соответствуют области максимального развития внетропических вихрей – циклонов в обоих полушариях (60° – 70°). В летние для полушарий полугодия в широтных зонах 5° – 15° в северном полушарии и 10° – 20° в южном полушарии отмечается максимальная дивергенция в тенденциях изменения переноса лучистой энергии или МГИ (летние зоны «неустойчивости»). Эти зоны совпадают с областями генерации тропических циклонов в полушариях. Из полученных результатов следует, что в связи с отмеченными особенностями в изменении МГИ будет возрастать и интенсивность вихревого переноса энергии в атмосфере (тропические и внетропические циклоны), т.е. будет

происходить усиление меридионального переноса тепла в системе океан – атмосфера.

В масштабе ОЦА отмечается увеличение годового МГИ в областях развития циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля и сокращение МГИ в полярных ячейках. В сезонном масштабе в полярных ячейках в зимние полугодия отмечается увеличение МГИ, в летние полугодия сокращение. Таким образом, годовая интенсивность циркуляционных процессов будет возрастать в циркуляционных ячейках Хэдли и Ферреля и сокращаться в полярных ячейках. Интенсивность сезонных циркуляционных процессов в полярных ячейках будет возрастать в зимние полугодия и сокращаться в летние.

Благодарность. Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой Географического факультета МГУ «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0), «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4), «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

Литература

1. Connolly R., Soon W., Connolly M., Baliunas S., Berglund J., Butler C.J., Cionco R.G., Elias A.G., Fedorov V.M., Harde H., Henry G.W., Hoyt D.V., Humlum O., Legates D.R., Luning S., Scafetta N., Solheim J.E., Szarka L., van Loon H., Velasco Herrera V.M., Willson R.C., Yan H., Zhang W. How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate // *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021. V. 21. 6. P. 1 – 68. DOI: 10.1088/1674-4527/21/6/131
2. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
3. Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // *Astronomical Papers*, 1950. V. 13. P. 81 – 107.
4. Berger A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary Climatic Changes // *Journal of Atmospheric Science*, 1978 (b). V. 35(12). P. 2362 – 2367.
5. Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82 // *Astronomy and Astrophysics*, 1982. V. 114. P. 278 – 288.
6. Borisenkov E. P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // *Climatic Change*, 1983. № 5. P. 237 – 244.
7. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr // *Astron. and Astrophys.*, 1993. V. 287. P. 522 – 533.
8. Cionco R.G., Soon W.W-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling // *Earth-Science Reviews*, 2017. V. 166. P. 206 – 222.
9. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 // *Processes in GeoMedia*. 2020. V. I. Pp. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
10. Monin A. S., Shishkov Yu. A. Climate as a problem of physics // *Physics–Uspekhi*, 2000, 43:4., 381–306. DOI: 10.1070/PU2000v043n04ABEH000678

11. Temperature data. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperatur> , дата обращения 23.06.2022.
12. Climate Change, 2013. Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. P. 659 – 740.
13. Fedorov V.M. Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // *Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics*, 2015. V. 51. № 8. P. 779 – 791. DOI: 10.1134/S0001433815080034.
14. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> – дата обращения 23.06.2022.
15. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*, 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777.
16. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. V. 60. № 7. Pp. 993–998. DOI: 10.1134/S0016793220070117.
17. Davis B. A. S., Brewer S. Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature gradient // *Clim. Dyn.*, 2009. V. 32. P. 143–65
18. Soon W., Legates D. R. Solar Irradiance modulation of Equator-to-Pole (Arctic) temperature gradients: Empirical evidence for climate variation on multi-decadal timescales // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013. 93. 45–56
19. Cionco R. G., Soon W. W.-H., Quaranta N. E. On the calculation of latitudinal insolation gradients throughout the Holocene // *Advances in Space Research*, 2020. V. 66. P. 720–742 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.030>
20. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 616 с.
21. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
22. Погосян Х. Циклоны. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 148.
23. AOML NOAA. URL: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqE.html>
24. WMO. URL: <https://public.wmo.int/ru>
25. Peixoto J.P., Oort A.H., 1984. Physics of climate. *Rev. Modern Phys.*, Vol. 56, No. 3., pp. 365 – 429.
26. Trenberth K.E., Caron J.M., 2001. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *American Meteorological Society*, Vol.14, pp. 3334 – 3343.
27. Fedorov V.M. Variations of the earth`s insolation and especially their integration in physical and mathematical models of the climate // *Physics Uspekhi*, 2019. V. 62. № 1. Pp. 32–45. DOI: 10.3367/UFNe.2017.12.038267

References

1. Connolly R., Soon W., Connolly M., Baliunas S., Berglund J., Butler C.J., Cionco R.G., Elias A.G., Fedorov V.M., Harde H., Henry G.W., Hoyt D.V., Humlum O., Legates D.R., Luning S., Scafetta N., Solheim J.E., Szarka L., van Loon H., Velasco Herrera V.M., Willson R.C., Yan H., Zhang W. How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate // *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021. V. 21. 6. P. 1 – 68. DOI: 10.1088/1674-4527/21/6/131
2. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata*. M.–L.: GONTI, 1939. 208 s.

3. Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // *Astronomical Papers*, 1950. V. 13. P. 81 – 107.
4. Berger A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary Climatic Changes // *Journal of Atmospheric Science*, 1978 (b). V. 35(12). P. 2362 – 2367.
5. Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82 // *Astronomy and Astrophysics*, 1982. V. 114. P. 278 – 288.
6. Borisenkov E. R., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // *Climatic Change*, 1983. № 5. P. 237 – 244.
7. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to + 10 Myr // *Astron. and Astrophys.*, 1993. V. 287. P. 522 – 533.
8. Cionco R.G., Soon W.W-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling // *Earth-Science Reviews*, 2017. V. 166. P. 206 – 222.
9. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 // *Processes in GeoMedia*. 2020. V. I. Pp. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
10. Monin A. S., Shishkov Yu. A. Climate as a problem of physics // *Physics–Uspekhi*, 2000, 43:4., 381–306. DOI: 10.1070/PU2000v043n04ABEH000678
11. Temperature data. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperatur>, data obrashcheniya 23.06.2022.
12. *Climate Change*, 2013. Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. P. 659 – 740.
13. Fedorov V.M. Spatial and temporal variation in solar climate of the Earth in the present epoch // *Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics*, 2015. V. 51. № 8. P. 779 – 791. DOI: 10.1134/S0001433815080034.
14. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> – data obrashcheniya 23.06.2022.
15. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*, 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777.
16. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. V. 60. № 7. Pp. 993–998. DOI: 10.1134/S0016793220070117.
17. Davis B. A. S., Brewer S. Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature gradient // *Clim. Dyn.*, 2009. V. 32. P. 143–65
18. Soon W., Legates D. R. Solar Irradiance modulation of Equator-to-Pole (Arctic) temperature gradients: Empirical evidence for climate variation on multi-decadal timescales // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013. 93. 45–56
19. Cionco R. G., Soon W. W.-H., Quaranta N. E. On the calculation of latitudinal insolation gradients throughout the Holocene // *Advances in Space Research*, 2020. V. 66. P. 720–742 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.030>
20. Palmen E., N'yuton Ch. Cirkulyacionnye sistemy atmosfery. L.: Gidrometeoizdat, 1973. 616 s.
21. Lorenc E.N. Priroda i teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 260 s.
22. Pogosyan H. Ciklony. L.: Gidrometeoizdat, 1976. S. 148.
23. AOML NOAA. URL: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqE.html>
24. WMO. URL: <https://public.wmo.int/ru>
25. Peixoto J.P., Oort A.H., 1984. Physics of climate. Rev. Modern Phys., Vol. 56, No. 3., pp. 365 – 429.

26. Trenberth K.E., Caron J.M., 2001. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *American Meteorological Society*, Vol.14, pp. 3334 – 3343.
27. Fedorov V.M. Variations of the earth`s insolation and especially their integration in physical and mathematical models of the climate // *Physics Uspekhi*, 2019. V. 62. № 1. Pp. 32–45. DOI: 10.3367/UFNe.2017.12.038267

Peculiarities of changes in the meridional gradient of insolation in the modern era

Valery Fedorov^{1,2}

Denis Frolov^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: fedorov.msu@mail.ru,

³E-mail: frolov@geogr.msu.ru

Abstract. The work is devoted to the use of methods of geoinformatics for the purposes of bioenergy. The main methods and trends in the development of this scientific area over the past 50 years are described. A review of international and domestic practice of research in this area has been carried out. Various methods of mapping bioenergy resources are presented, as well as tools that solve the problem of finding optimal places for placing energy facilities on biomass resources. The specifics of spatial data used in solving the problems of the bioenergy industry and the features of working with them in the environment of geographic information systems (GIS) are described.

Keywords: bioenergy, mapping methods, geoinformation systems, resources, geodatabases

Acknowledgement. The work was carried out in accordance with the state budget topic of the Faculty of Geography of Moscow State University “Paleoclimates, evolution of the natural environment and long-term forecast of its changes” (121051100135-0), “Danger and risk of natural processes and phenomena” (121051300175-4) and “Evolution of the cryosphere under climate change and anthropogenic impact” (121051100164-0).

Парусная энергетическая установка наземного базирования

Чекарев Константин Владимирович^{[0000-0002-5140-5142]1,2}

Залиханов Алим Михайлович^{[0000-0002-2540-6045]1,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail:kostya-chekarev@yandex.ru,

³E-mail:bulungu@yandex.ru

Аннотация. Установки, преобразующие кинетическую энергию ветра в электричество, в том числе плавающие ветровые установки, из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры. Известен вариант парусной энергетической установки, преобразующей энергию ветрового потока в энергию водного потока, который используется для производства электричества, что позволяет уменьшить размеры преобразователя энергии, однако эффективность энергетических установок при этом падает, поскольку часть энергии ветрового потока расходуется на перемещение парусной установки. Кроме этого, возникают сложности при передаче вырабатываемой энергии внешнему потребителю. Эффективность парусной энергетической установки может быть повышена, если ее установить на земле. В этом случае, для выработки электричества используется движение установки, при этом проблема с передачей вырабатываемой энергии внешнему потребителю снимается. Кроме этого парусные энергетические установки наземного базирования расширяют область использования ветроэнергетики. Был проведен анализ возможных путей реализации парусной энергетической установки наземного базирования, а также была создана экспериментальная установка, на которой были проведены испытания макетов парусных энергетических установок с целью проверки функционирования входящих в экспериментальную установку элементов и нахождения элементов конструкции, которые могут быть использованы при реализации парусной установки наземного базирования. Результаты этих исследований представлены в данной статье.

Ключевые слова: ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, ветровая установка, парусная энергетическая установка.

1 Введение

Ветроэнергетика является одной из самых быстро развивающихся отраслей возобновляемой энергетики. По оценкам TheGlobalWindCouncil (GWEC), представленном в отчете за 2021 год [1], 2020 год был лучшим в глобальной ветроэнергетике. Мощность ветровых установок увеличилась на 93 ГВт, из них 6,1 ГВт приходится на оффшорные установки. В 2020 году общая установленная мощность оффшорных установок достигла величины 35 ГВт, что составляет 4,8 % от общего числа ветровых установок. Одной из причин, ограничивающих рост оффшорных установок, является их зависимость от глубины моря. Для уменьшения этой зависимости разработаны плавающие ветровые установки. Первая плавающая ветровая установка была построена у берегов Норвегии в 2009 году, затем плавающие ветровые установки были построены в других странах [2, 3].

В большинстве действующих ветровых установках преобразование энергии ветрового потока в электричество осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на мачте. Такая ориентация ветроколеса является оптимальной для эффективного преобразования энергии ветрового потока, поскольку силы, действующие на лопасти ветроколеса, остаются постоянными при их перемещении. Из-за низкой плотности воздуха в установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 200 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующее основание, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки.

При строительстве плавающих ветровых установок это приводит к усложнению конструкций и увеличению их стоимости при обеспечении остойчивости энергетических установок.

Предлагаются различные варианты решения проблемы, связанной с большими размерами преобразователей энергии ветрового потока.

2 Аналитический обзор

Был предложен вариант ветроэнергетической морской установки повышенной мощности, в которой система жестких парусов, выполненная в виде вертикальных лопастей, удерживается на поверхности воды кольцевым понтоном, который вращается вокруг вертикальной оси [4]. В предлагаемой конструкции энергетической установки проблема создания прочной опоры при больших размерах преобразователей энергии снимается, однако эффективность преобразования ветрового потока при этом уменьшается, поскольку на половине траектории преобразователи ветровой энергии движутся под острым углом к направлению ветра. Установка может работать только при большом диаметре кольцевого понтона, в противном случае система наветренных парусов будет перекрывать систему парусов, находящихся за ними. Однако при большом диаметре кольцевого понтона практически невозможно создать конструкцию, способную выдерживать волновое воздействие.

Известен вариант парусной энергетической установки, также позволяющей снять проблему больших размеров преобразователя энергии ветрового потока и проблему устойчивости к волновому воздействию [5]. Предложенный вариант энергетической установки содержит парусный катамаран, к корпусам которого снизу прикреплен гидрогенератор, выполненный в виде крыльчатки и электрогенератора. При движении катамарана возникает обтекающий его корпуса водный поток, который вращает крыльчатку и соединенный с ней электрогенератор. Траектория катамарана представлена в виде треугольника, одна из сторон которого перпендикулярна направлению ветра. В усовершенствованном варианте этой парусной энергетической установки катамаран движется циклично по дуговой траектории в заданном угловом интервале, что позволяет увеличить эффективность преобразования энергии ветрового потока [6]. Для движения по такой траектории катамаран выполнен в виде конструкции, симметричной относительно носа и кормы, и имеет систему изменения положения парусов и систему изменения направления движения катамарана. Движение по дуговой траектории позволяет автоматизировать этот процесс [7]. Однако в предлагаемых вариантах энергетических установок их эффективность также оказывается низкой, поскольку часть энергии ветрового потока расходуется на перемещение катамарана. Кроме этого, возникают сложности с передачей вырабатываемого электричества внешнему потребителю электричества.

Эффективность парусной энергетической установки можно повысить и при этом снять проблему передачи вырабатываемой энергии внешнему потребителю, если сделать парусную энергетическую установку наземного базирования. Эффективность энергетической установки может быть повышена за счет того, что перемещение установки можно использовать для производства электричества, а не получать его за счет перемещений преобразователя энергии, при этом вырабатываемое электричество можно передавать внешнему потребителю по контактному рельсу.

Известен вариант конструкции парусной энергетической установки наземного базирования [8], который является сухопутным аналогом ветроэнергетической морской установки [4]. Установка содержит платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по радиальному рельсовому пути. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электричество вырабатывается с помощью электрогенераторов, соединенных с колесами платформ. Как и ветроэнергетическая морская установка [4], предлагаемая конструкция может работать только при большом диаметре рельсового пути, поскольку при малых диаметрах система наветренных парусов будет перекрывать систему парусов, расположенную за ней. При этом эффективность преобразования энергии ветрового потока будет низкой, поскольку на половине пути платформы перемещаются под острым углом к направлению ветра.

Эффективность энергетических установок данной конструкции можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ так, как это сделано в парусной энергетической установке [6]. Это

означает, что платформы должны двигаться циклично в заданном угловом интервале и иметь систему изменения положения парусов и систему управления движением платформ для того, чтобы платформы начинали двигаться в противоположную сторону в точках, ограничивающих угловой интервал перемещений платформ.

В возможности реализации парусных энергетических установок сомнений нет. Есть свидетельства использования парусов для организации движения колесного транспорта в Китае много веков тому назад. В 19 веке в северной Америке паруса ставились на повозки для поездок из города в город [8]. С появлением железных дорог паруса стали устанавливать на платформы для организации их движения [9], однако использование парусов для производства электричества развития не получило. Можно предположить, что этого было несколько причин. Во-первых, энергетическая эффективность установок с ветроколесом с горизонтальной осью вращения выше, чем у других установок. Во-вторых, в тех местах, где установки с ветроколесом с горизонтальной осью вращения сооружались, была возможность их поставить, т.е. грунт был такой, что на нем можно было поставить башню, на которой устанавливается ветроколесо и электрогенератор.

Однако имеется много мест, где есть потребность в электроэнергии, и есть возможность получать её с помощью энергии ветра, но нет возможности поставить высокие мачты. В этом случае использование парусных установок наземного базирования может быть решением проблемы. Такая ситуация существует, например, в Арктике в местах, расположенных на вечной мерзлоте. Можно привести и другие примеры областей, где могут быть использованы парусные энергетические установки наземного базирования. Отсюда следует необходимость проводить разработку конструкций таких систем, в частности, при проведении лабораторных исследований на макетах энергетических установок.

3 Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Устройство элементов экспериментальной установки отработывалось в процессе проведения экспериментов, при этом учитывался опыт и использовались элементы экспериментальной установки, на которой проводились исследования парусной энергетической установки морского базирования [6]. Экспериментальная установка включала генератор ветрового потока, платформы, на которых были установлены паруса, систему изменения положения парусов, направляющую систему, и систему управления движением платформ.

Одним из наиболее значимых элементов экспериментальной установки является генератор ветрового потока. На начальной стадии проведения экспериментов использовался генератор ветрового потока старой конструкции, который был выполнен в виде системы вытяжных вентиляторов в количестве 8 штук, расположенных на рейке длиной 2 метра на расстоянии 22 см друг от друга [11]. Конструкция генератора ветрового потока была разработана на основе получен-

ной трехмерной картины, показывающей границы ветрового потока, генерируемого отдельным вентилятором. В генераторе старой конструкции из-за дискретности расположений вентиляторов на рейке существует неравномерность ветрового потока по горизонтали. В экспериментах с макетами парусных энергетических установок морского базирования, выполненных в виде катамаранов, можно было пользоваться генератором ветрового потока такой конструкции, поскольку сила сопротивления воды движению судна пропорциональна квадрату скорости и в начале движения она практически равна нулю, поэтому при проведении экспериментов катамараны начинали двигаться при любом ветровом воздействии. В экспериментах с парусными установками наземного базирования одной из сил сопротивления является сила трения колес. При горизонтальном движении платформы сила трения пропорциональна ее весу и в начале движения она не равна нулю. На начальной стадии проведения экспериментов было обнаружено, что при увеличении веса платформы воздействие генератора ветрового потока старой конструкции оказывалось недостаточным для того, чтобы платформы двигались с нужной скоростью. Был создан генератор ветрового потока, в котором неравномерность ветрового потока по горизонтали устранялась. Для этого на рейке длиной 2 метра было установлено 15 вентиляторов, расположенных плотно друг к другу. Изображение генератора ветрового потока представлено на рис.1.



Рис. 1. Генератор ветрового потока

Конструкция платформ также разрабатывалась в процессе проведения экспериментов: ее размер, количество установленных мачт, способ их крепления, форма парусов, способ изменения положения парусов, размер и тип колес. Изображение разработанной конструкции, на которой проводились эксперименты, представлено на рис.2. Рамка платформы, к которой крепились 4 пластмассовых колеса диаметром 40 мм, имела размер 22 см в длину и 17 см в ширину. В середине платформы на высоте 30 мм от рамки крепилась рейка, на которой в поворотных устройствах глубиной 30 мм устанавливались мачты, выполненные в виде пластиковых трубок диаметром 5 мм и высотой 30 см. В начале проведения экспериментов на платформе устанавливались 3 мачты, однако для того, чтобы осуществлять управление ее движением, было необходимо увеличить вес платформы, что приводило к уменьшению ее скорости. Чтобы сохранить скорость

платформы, на нее уставили еще одну мачту. Мачты были расположенные на расстоянии 11 см друг от друга и соединены легкими перемычками. Мачты поворачивались вокруг своей оси с помощью системы изменения положения парусов. На начальном этапе проведения экспериментов использовалась старая конструкция системы изменения положения парусов, которая не позволяла точно выставлять угловые параметры положения парусов. При проведении экспериментов возникла необходимость точно устанавливать угол поворота парусов, поскольку от углового положения парусов зависела скорость платформ. Для задания точного углового положения парусов была разработана система изменения положения парусов, которая включала электродвигатель с редуктором, на вал которого была надета небольшая шестеренка, а на одной из мачт была закреплена шестеренка большего диаметра. Для того, чтобы электродвигатель мог вращаться по часовой и против часовой стрелки, на платформе устанавливали два аккумулятора, что увеличивало вес платформы, а значит, и силу трения. В зависимости от поставленной задачи мачты могли поворачиваться в угловом диапазоне 70-100 угл. град.



Рис. 2. Платформа с парусами на направляющем рельсе. Устройство радиуправления на переднем плане

К мачтам были прикреплены паруса площадью 312 см^2 каждый. В начале проведения экспериментов использовались паруса, закрепленные на мачтах с гиком, однако в ходе проведения экспериментов было обнаружено, что поворот паруса такой конструкции представлял большую нагрузку для системы изменения положения парусов: в отсутствии ветрового потока паруса легко поворачивались, а

при воздействии ветрового потока они поворачиваться переставали. Чтобы снизить нагрузку, паруса сделали симметричной формы относительно мачты, как это видно на рис. 2. Размеры парусов составляли по высоте 24 см, по ширине внизу 16 см. и сверху 10 см. Паруса были сделаны из металлизированной пленки, которая крепилась к мачте и нижней рее, и были усилены 3 ребрами.

Платформы двигались по гладкой, горизонтальной плоскости длиной 3 метра и шириной 1,2 м. Траектория движения платформ задавалось направляющей системой, которая была разработана для проведения экспериментов. Она включала 3 направляющих рельса, расположенных на расстоянии 35 см, 50 см и 65 см от выходных отверстий генератора ветрового потока. Направляющие рельсы были выполнены в виде прямых пластмассовых полос размером с сечением 12 x 12 мм и длиной 2 метра. На всех направляющих была нанесена цифровая разметка, означающая интервал в 10 см. Начало разметки совпадало с серединой генератора ветрового потока. Направляющая система включала также 4 колеса диаметром 15 мм, закрепленных по 2 на коротких сторонах рамки платформы. Их оси были направлены вертикально, находились на расстоянии 32 мм и были установлены так, чтобы направляющий рельс находился между ними. Расположение направляющих колес видно на рис.2. При таком расположении колес платформы свободно перемещались вдоль направляющего рельса.

В состав экспериментальной установки входила система, имитирующая управление движением платформы по ее положению, которая задается координатами GPS. Управление осуществлялось с помощью радиосигналов, которые передавались с пульта на установленный на платформе приемник, соединенный с системой изменения положения парусов. По этому сигналу паруса изменяли свое положение на противоположное в угловом интервале 70°-100°. Для работы приемника радиосигналов на платформе устанавливался аккумулятор, что также увеличивало вес платформы.

При проведении экспериментов движение платформ снималось на видеорекамеру. По полученным записям и с помощью разметки на направляющих рельсах строились графики движения платформ в зависимости от времени, по которым определялась скорость движения платформ.

4 Результаты экспериментов и обсуждение

Целью проведения экспериментов являлась, во-первых, проверка функционирования входящих в установку элементов и выявление возникающих проблем и, во-вторых, отработка элементов конструкции, которые могут быть использованы при реализации парусной энергетической установки наземного базирования.

Экспериментальные исследования начались с определения трехмерной картины ветрового потока, который создается генератором этого потока с помощью 15 вентиляторов. Для этого с помощью анемометра были измерены скорости ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от выходных отверстий вентиляторов на расстоянии 35 см, 50 см и 65 см. Распределение скоростей по высоте

в этих плоскостях представлены на рис. 3, а трехмерная картина ветрового потока представлена на рис. 4.

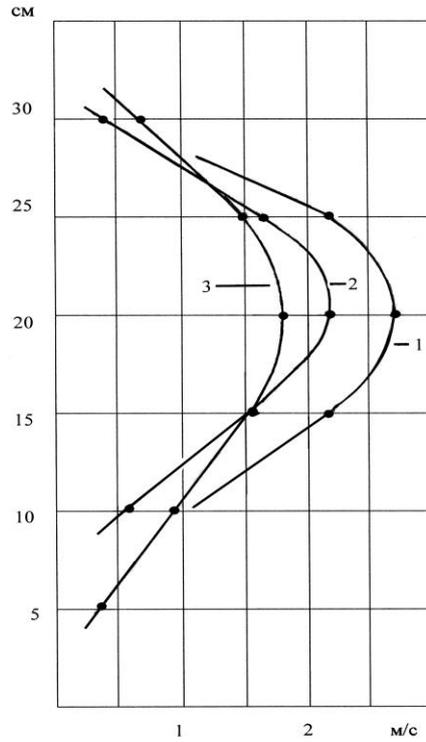


Рис. 3. График распределения скоростей в вертикальных плоскостях, отстоящих от генератора ветрового потока на расстояниях: 1) 35 см, 2) 50 см, 3) 65 см.

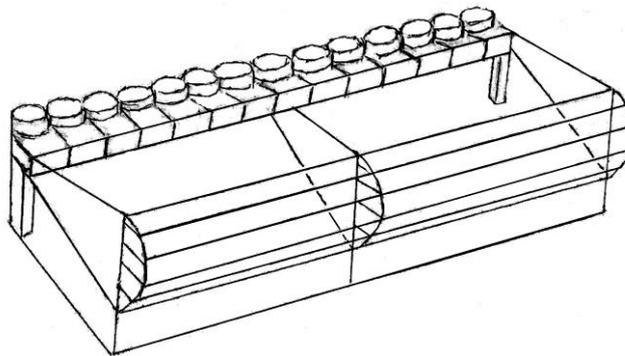


Рис. 4. Трёхмерная картина распределения ветрового потока

Как видно из рисунков, наибольшая неравномерность ветрового потока наблюдается в плоскости 35 см, при этом во всех плоскостях неравномерность ветрового потока по горизонтали отсутствует. Показателем эффективности воздействия ветрового потока на движение платформ является их скорость. При таком различии распределений величины скорости ветрового потока по высоте в разных плоскостях эффективность его воздействия на скорость движения платформ можно найти только при проведении экспериментальных исследований движущих платформ в этих плоскостях.

Были проведены исследования движения платформ вдоль направляющих, отстоящих от выходных отверстий вентиляторов на расстоянии 35 см, 50 см и 65 см. Графики зависимости перемещений платформ от времени вдоль направляющих рельсов, отстоящих от выходных отверстий генератора ветрового потока на расстояниях 30 см, 50 см и 65 см представлены на рис.5. На этом же рисунке приведены величины скорости перемещений платформ по этим направляющим. Как видно из графиков перемещений и значений скоростей, эффективность воздействия ветрового потока на величину скорости платформ, при их движении в этих плоскостях, практически одинакова, что имеет большое значение при проведении исследований.

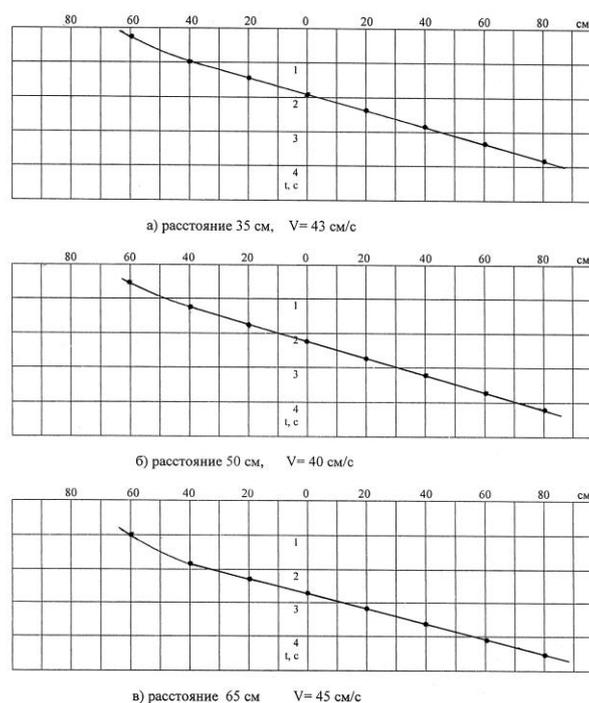


Рис. 5. График перемещения платформы в зависимости от времени по направляющим рельсам, отстоящим от генератора ветрового на расстояниях: а) 35 см, б) 50 см, в) 65 см

Была проведена серия экспериментов по определению зависимости скорости платформ от углового положения парусов относительно направления ветра. Величины углов изменялись в диапазоне 70°-100°. Платформа двигалась по направляющему рельсу, находящемуся на расстоянии 50 см от генератора ветрового потока. На рис.6 представлен график зависимости скорости платформы от величины углового положения парусов. Как видно из графика, скорость движения платформы достигает наибольшего значения при угловом положении парусов 100°. При проведении экспериментов была установлена зависимость скорости платформы от стороны поверхности паруса, с которой взаимодействует ветровой поток. Как было сказано выше, парус был выполнен в виде металлизированной пленки, наклеенной на мачты. Для усиления прочности паруса на него были наклеены 3 ребра. Эксперименты показали, что при одинаковом угловом положении парусов платформы движутся с меньшей скоростью, если ветровой поток направлен на сторону паруса, усиленную ребрами. На рис.6 приведены значения скоростей для гладкой стороны паруса и для стороны паруса с ребрами. В причинах такого явления нужно разобраться в следующих экспериментах.

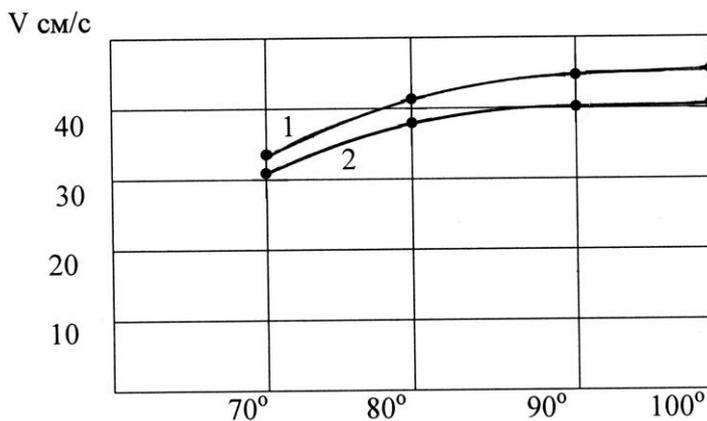


Рис. 6. График зависимости скорости платформ от углового положения парусов. 1 – гладкая сторона паруса, 2 - сторона паруса с ребрами.

Функционирование системы изменения положения парусов и системы управления движением платформ можно проверить только при их совместной работе. Были проведены исследования перемещений платформы по направляющему рельсу, отстоящему от генератора ветрового потока на расстоянии 50 см при управлении движением платформы с помощью радиосигналов. График перемещений платформы в зависимости от времени представлен на рис.7.

Как видно из графика, платформа четко меняет направление движения, что говорит о нормальном функционировании системы изменения парусов и системы управления движением платформы. Изменение направления движения платформы происходит за временной интервал меньше 1 секунды, а временной интервал установления движения с постоянной скоростью лежит в пределах 1,5-2

секунд. Результаты экспериментов по управлению движением платформы с помощью радиосигналов показали, что управление движением платформы по ее положению возможно, если радиосигналы с пульта управления заменить сигналами положения платформы, которые задаются координатами GPS.

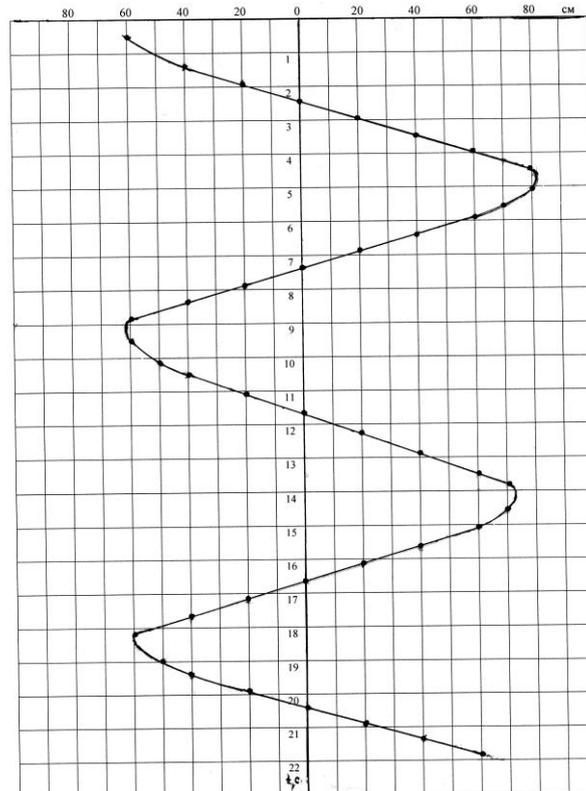


Рис. 7. График перемещений платформы в зависимости от времени в режиме радиуправления.

5 Выводы

На основании результатов, полученных в процессе проведения экспериментов, можно сделать следующие выводы:

а) Относительно экспериментальной установки: все входящие в нее элементы функционировали нормально, и их можно использовать при проведении дальнейших исследований.

б) Относительно конструкции платформы парусной энергетической установки: разработанная конструкция платформы может быть использована при реализации парусной энергетической установки наземного базирования, однако

устройство некоторых ее элементов требует уточнения, которое можно получить в ходе дальнейших исследований. Это касается, в частности, устройства паруса, его формы, структуры.

в) Экспериментальные исследования показали, что управление движением платформы по сигналам GPS возможно.

В ходе проведения последующих экспериментов следует разработать методику экспериментального определения сил, действующих на платформу, которые определяют ее движение.

Кроме этого, нужно решить проблему передачи выработанного электричества внешнему потребителю по контактному рельсу. Таким образом, имеется множество вопросов, которые нужно уточнить с помощью экспериментальных исследований на макетах парусной энергетической установки наземного базирования.

Литература

1. Global Wind Report 2021 – Global Wind Energy Council. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2021> access date 27.06.2022.
2. Первая в мире плавучая офшорная ветровая электростанция... URL: <https://renew.ru/per-va-ya-v-mire-plavuchaya-ofshornaya-vetrovaya-elektrostantsiya-rabotaet-s-rekordnym-kium/> access date 27.06.2022
3. WindFloat Atlantic Project. URL: <https://power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project/> access date 27.06.2022
4. Чебоксаров В.В., Кузнецов Н.Н. Гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки // Строительство и техногенная безопасность. №18(70)-2020. С.67-81
5. Соловьев А.А., Чекарев К.В., Соловьев Д.А. Патент РФ № 2 722 760. Парусная энергетическая установка, преобразующая энергию потоков двух сред.
6. Чекарев К.В., Дегтярев К.С., Залиханов А.М. Патент РФ № 2 745 173. Парусная энергетическая установка.
7. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. Парусная энергетическая установка// География возобновляемых источников энергии. ИД «Энергия», Москва, 2021. С. 180-197
8. Цыбульников С.И. Патент РФ № 2 125 182 Ветроэнергетическая установка
9. Kansas Historical Society “Wind Wagon” Archived from the original on July 6 2017. Retrieved 7 July 2017. URL: <https://www.kansasmemory.org/item/318948> access date 27.06.2022
10. Дига́й П. Под парусами по рельсам. URL: https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html access date 27.06.2022
11. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Соловьев Д.А., Дегтярев К.С. Парусная энергетическая установка, преобразующая энергию потоков двух сред// Окружающая среда и энерговедение: № 3. 2020. С.39-46.

References

1. Global Wind Report 2021 – Global Wind Energy Council. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2021> access date 27.06.2022.

2. Pervaya v mire plavuchaya ofshornaya vetrovaya elektrostanciya... URL: <https://rener.ru/pervaya-v-mire-plavuchaya-ofshornaya-vetrovaya-elektrostantsiya-rabotaet-s-rekordnym-kiom/> access date 27.06.2022
3. WindFloat Atlantic Project. URL: Power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project access date 27.06.2022
4. Cheboksarov V.V., Kuznecov N.N. Gibridnye vetro-solnechnye morskije energeticheskie ustanovki // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. №18(70)-2020. S.67-81
5. Solov'yov A.A., Chekarev K.V., Solov'yov D.A. Patent RF № 2 722 760. Parusnaya energeticheskaya ustanovka, preobrazuyushchaya energiyu potokov dvuh sred.
6. Chekarev K.V., Degtyarev K.S., Zalihanov A.M. Patent RF № 2 745 173. Parusnaya energeticheskaya ustanovka.
7. Chekarev K.V., Zalihanov A.M., Degtyarev K.S. Parusnaya energeticheskaya ustanovka// Geografiya vozobnovlyaemyh istochnikov energii. ID «Energiya», Moskva, 2021. S. 180-197
8. Cybul'nikov S.I. Patent RF № 2 125 182 Vetroenergeticheskaya ustanovka
9. Kansas Historical Society "Wind Wagon" Archived from the original on July 6 2017. Retrieved 7 July 2017. URL: <https://www.kansasmemory.org/item/318948> access date 27.06.2022
10. Digaj P. Pod parusami po rel'sam. URL: https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html access date 27.06.2022
11. Chekarev K.V., Zalihanov A.M., Solov'ev D.A., Degtyarev K.S. Wind-driven power machine transforming energy of the two environs // Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES). № 3. 2020. p.39-46.

Land-based Sailing Power Plant

Konstantin Chekarev^{1,2}

Alim Zalihanov^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: kostya-chekarev@yandex.ru,

³E-mail: bulungu@yandex.ru

Abstract. Equipment that converts kinetic wind energy into electricity, including floating wind turbines, have large dimensions because of low air density. A variant of a sailing power plant is known, which converts the energy of the wind flow into the energy of a water current, which is used to produce electricity, which allows reducing the size of the energy converter, but the efficiency of power plants decreases at the same time, since part of the energy of the wind flow is spent on moving the sailing vehicle. In addition, there are difficulties in transferring the generated energy to an external consumer. The efficiency of a sailing power plant can be improved if it is installed on the ground. In this case, the movement of a vehicle is used to generate electricity, while the problem of transferring the generated energy to an external consumer is removed. In addition, land-based sailing power plants expand the field of wind energy use. An analysis of possible ways to implement a land-based sailing power plant was carried out, and an experimental installation was created on which mock-ups of sailing power plants were tested in order to verify the functioning of the elements included in the experimental installation and to find structural elements that can be used in the implementation of a land-based sailing installation. The results of these studies are presented in the article.

Keywords: wind power, renewable energy sources, wind plant, sailing power plant.