



2023
№2(18)

Окружающая среда и энергостудение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703
(Online)

Окружающая среда и энергосистемы

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2023 №2(18)

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. 2023 №2(18)

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 01.07.2023.

Издатель:

ООО "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

В.А. Бутузов, Е.В.Брянцева Научное обеспечение геотермальной электро- и теплогенерации	4
К.С. Дегтярев, О.А. Синюгин, М.Ю. Березкин Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России	16
В.М. Фёдоров, А.М. Залиханов, Е.В. Фёдорова О физической причине Североатлантической мультидекадной осцилляции	30
К.В. Чекарев, А.М. Залиханов Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформы.....	49
А.М. Залиханов, К.В. Чекарев Парусные энергетические установки наземного базирования: география использования	61

Content

V.A. Butuzov, E.V. Bryantseva Scientific Background of Geothermal Power and Heat Generation	4
K.S. Degtyarev, O.A. Sinyugin, M.Yu. Berezkin Development of financial and market instruments of low-carbon development in Russia.....	16
V.M. Fedorov, A.M. Zalikhonov, E.V. Fedorova On the Physical Cause of North-Atlantic Multidecadal Oscillation	30
K.V. Chekarev, A.M. Zalikhonov Land-Based Sailing Power Plant: a Method of Direct Measurement of Forces Acting on Platforms	49
A.M. Zalikhonov, K.V. Chekarev Land-Based Sailing Power Plant: Geography of Use	78

Научное обеспечение геотермальной электро- и теплогенерации

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

Брянцева Елена Витальевна^{[0009-0008-9526-0062]2,4}

¹ФГБОУ Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

²ООО «Энерготехнологии-Сервис», Краснодар, Россия

E-mail: ³ets@nextmail.ru, ⁴ekoenergy@mail.ru

Аннотация. В 2021 году геотермальная электрогенерация России имела установленную мощность 74 МВт с выработкой энергии 280 ГВт·ч/год, геотермальная теплогенерация составила 110 МВт и 428 ГВт·ч/год соответственно. В статье указано количество геотермальных месторождений и эксплуатируемых скважин, описаны структура и принципы эксплуатации. Рассмотрены основные результаты развития советской геотермальной энергетики. Представлены результаты исследований российских научных организаций по глубинной и поверхностной геотермии. Показана перспективность исследований по разработке и сооружению скважин со сверхкритическими параметрами флюидов у подножия вулканов на Камчатке. Представлены направления и наиболее важные результаты исследований отечественной научной школы геотермальной электрогенерации. Отмечены результаты работ российских научно-исследовательских организаций в области геотермальной теплогенерации в Краснодарском крае, Чечне и Дагестане.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика (ВЭ), ВЭС, СЭС, МГЭС, ГеоЭС, БиоЭС, ВИЭ, аукционы, «зеленые» тарифы, геотермальное месторождение, глубинная и поверхностная геотермия, ГеоЭС, геотермальные системы теплоснабжения (ГСТ), паровой и бинарный циклы, термораспределительные станции (ТРС), геотермальные центральные тепловые пункты.

1 Введение

Геотермальная энергетика России в 2021 году имела установленную мощность ГеоЭС 74 МВт, теплогенерации 110 МВт, выработку электрической энергии 280 ГВт·ч/год, тепловой энергии 428 ГВт·ч/год. В стране эксплуатировались три пароводяных геотермальных месторождения с 95 скважинами, из которых в 2021г. было добыто 13 млн.т/год пароводяной смеси (ПВС). На 33 гидрогеотермальных месторождениях с 101 скважиной было добыто 25,7 млн.м³/год. Состояние российской геотермальной энергетике в 2019 г. описано в статье [1]. Геотермальная энергетика как объект научных исследований имеет междисциплинарный характер и включает вопросы геологии и геофизики, технологий бурения, разработки и эксплуатации месторождений, технологий и оборудования электрогенерации и теплоснабжения. В зависимости от температуры теплоносителя из недр Земли различают глубинную и поверхностную геотермию (глубина менее 400 м). В формировании ресурсов поверхностной геотермии решающее значение имеет воздействие солнечной радиации на поверхность Земли. Глубинная геотермия в зависимости от вида пород разделяется на петрогеотермальную (тепло «сухих» пород) и геотермальную (паро-водонасыщенные породы). Отечественная геотермия достигла значительного развития в 1980-2000 годы [2]. Научные исследования в этой области знаний тогда возглавляла Академия наук СССР, а в работе под её руководством участвовало более 50 организаций. Разведкой, бурением, эксплуатацией геотермальных месторождений занимался Мингазпром СССР, в составе которого научно-производственное объединение (НПО) «Союзгеотерм» выполняло весь комплекс геотермальных исследований. Максимальная добыча геотермальной воды в СССР была достигнута в 1985г. – 60 млн.м³/год. Установленная мощность ГеоЭС в 1999 г. составляла 24 МВт, а теплогенерации – 308 МВт.

Геотермальная наука в СССР имела четыре основные научные школы: московскую (Геологический институт АН СССР, Объединенный институт физики Земли, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского); ленинградскую (Ленинградский горный институт); киевскую и дагестанскую (НПО «Союзгеотерм»).

В 1996-2012 годы наиболее значимых результатов достигла научная школа геотермальной энергетике д.т.н., проф. О.А.Поварова. Созданная в НИУ «МЭИ» на основе экспериментальной базы опытной ТЭЦ эта школа в творческом сотрудничестве с Калужским турбинным заводом обеспечила разработку и изготовление геотермальных паровых турбин мирового уровня и сооружение на их основе новых российских ГеоЭС.

2 История изысканий в геотермальной энергетике

Рынок возобновляемой энергетики России формировался с 2007 года внесением изменений в закон №35-ФЗ от 26.03.2003 г. «Об электроэнергетике». В основе оптового рынка – реализация планов «ДПМ – ВИЭ». Распоряжением Правительства РФ №1446-Р от 21.06.2021 г. утвержден новый план «ДПМ – ВИЭ – 2.0» до 2035 г. со строительством ветровой, солнечной, малой гидроэнергетики суммарной установленной мощностью до 12 ГВт. Постановлением Правительства РФ № 2486 от 25.12.2021г. уточнены требования к квалифицированным объектам, по корректировке размеров неустойки, в определение цены мощности электрогенерации ВИЭ. Распоряжением Правительства РФ №2765-Р от 01.10.2021 г. о федеральном проекте «Чистая энергетика» предусмотрены ежегодные конкурсы проектов ВИЭ и создание отечественной системы сертификации электроэнергии на ВИЭ, а Распоряжением Правительства РФ №3052-Р от 29.10.2021 г. по декарбонизации предусмотрено развитие технологий генерации энергии на ВИЭ. Расширение использования солнечной электрогенерации на объектах транспортной инфраструктуры регламентирует Распоряжение Правительства РФ №3363-Р от 27.11.2021 г. Розничный рынок электроэнергии ВЭ организован в соответствии с Постановлением Правительства РФ №1298 от 29.08.2020 г. Отбор проектов производится согласно схем и программ развития электроэнергетики регионов (СИПР) при плановой стоимости 1 МВт.ч. В 2021 г. Минэнерго РФ велась работа по модернизации неэффективных электростанций в 23 регионах страны с установкой ВЭ общей установленной мощностью 791 МВт. В 2021г. Постановлением Правительства РФ №299 от 02.03.2021г. уточнен механизм реализации закона №471-ФЗ от 27.12.2019 г. об установке объектов микрогенерации у частных и юридических лиц с возможностью продажи излишков электроэнергии в электросети. Распоряжением Правительства РФ от 24.03.2022 №594-Р Минэнерго РФ поручено с 1.03.2023г. предоставлять правительству следующую информацию по электрогенерации на основе ВИЭ: анализ цен на оптовом и розничном рынках; ввод в эксплуатацию новых электростанций; установленные мощности генераций, отобранных на конкурсных торгах.

Первые системные научно-технические разработки в области геотермальной энергетики в России были начаты в 1954 году по решению Президиума Академии наук СССР о создании в г. Петропавловске-Камчатском лаборатории по исследованию геотермальных ресурсов. По инициативе и под руководством академика АН СССР М.А. Лаврентьева в 1955 г. было выполнено первое системное изучение гидротермальных ресурсов. В России на основе проведенного экспедиционного обследования геотермальных источников Камчатки и многолетних исследований советских ученых были разработаны атласы и карты геотермальных ресурсов страны. В работе [3] представлены ресурсы геотермальных водяных, а в [4] они дополнены петрогеотермальными ресурсами.

В настоящее время, исследования в области петрогеотермальных ресурсов ведутся группой ученых под руководством д.т.н., проф. Э.И. Богуславского. Он является известным российским специалистом по ресурсам поверхностной геотермии (до 400 м). В его монографии [5] представлены карты «нейтрального» слоя территории России, распределения температур горных пород на глубинах до 200 метров, результаты исследований конвективного теплообмена в проницаемых водонасыщенных горных породах и при обтекании ствола геотермальной скважины подземными водами. Исследования в области поверхностной геотермии выполняют специалисты под руководством д.т.н. Г.П. Васильева. Ими изучен теплообмен в горных породах с учетом фазового перехода грунтовых вод, а также разработаны теоретические основы этих процессов, результаты которых изложены в монографии [6]; получены результаты моделирования теплообмена в горных породах средней полосы России, представленные в статье [7].

Ведущей научной организацией страны по глубинной геотермии, в том числе по изучению парогидротермальных месторождений является Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) РАН в г. Петропавловск-Камчатский. Результаты его оценки запасов пароводяных и водяных геотермальных ресурсов Камчатки представлены в статье [8]. ИВиС выполняет исследования по изучению технических возможностей и технико-экономической целесообразности бурения и использования геотермальных скважин со сверхкритическими параметрами у подножья Камчатских вулканов [9]. На международных научных конференциях, организованных ИВиС, регулярно принимают участие до 130 ученых, в том числе ведущих из зарубежных стран.

Традиции дагестанской научной геотермальной школы с 1980 г. продолжает Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики (ИПГиВЭ) ОИВТ РАН в г. Махачкале. В его составе 130 кандидатов и докторов наук, работающих в областях геологии, геофизики, технологий бурения и разработки месторождений, электро и теплогенерации, извлечения редких химических реагентов. Руководителем ИПГиВЭ является д.т.н., проф. А.Б. Алхасов, в монографиях [10, 11] и сборнике [12], которого представлены основные наиболее значимые результаты многолетних исследований института.

Институт геологии РАН представляет московскую научную школу в области глубинной геотермии. В работах д.г.- м.н. М.Д. Хуторского с соавторами [13,14] выполнены оценки на 2010 год геотермальных ресурсов России, определены современные тенденции и перспективы развития геотермии в нашей стране [15]. В московском Геологическом музее им. В.И. Вернадского под руководством д.т.н. С.В. Черкасова также ведут научные исследования по использованию геотермальных ресурсов в теплоснабжении. Так, при его активном участии была разработана и в 2015 году реализована геологическая модель Ханкальского геотермального месторождения и создана автономная система геотермального теплоснабжения в Чеченской Республике [16, 17].

Исследованиями пароводяных и геотермальных скважин в Дальневосточном научном центре РАН руководит д.т.н. А.Н.Шулюпин [18, 19].

Советская научная школа геотермальной электроэнергетики в лице Института технической теплофизики в Новосибирске (под руководством д.т.н.

С.С.Кутателадзе) и Новосибирского филиала института «Теплоэлектропроект» (во главе с к.т.н. Б.М.Выморковым) разработала и обеспечила в 1966 году сооружение первой в СССР Паужетской ГеоЭС прямого цикла на Камчатке, которая состояла из двух энергоблоков мощностью по 2,5 МВт каждый с турбинами МК-2,5-1,8 Калужского турбинного завода [20]. После строительства второй очереди в 1982 г. установленная мощность Паужетской ГеоЭС достигла 11,0 МВт.

По проекту Новосибирского отделения ГИПРОНИИ СО АН СССР в 1967 г. была сооружена Паратунская экспериментальная бинарная геотермальная электростанция мощностью 600 кВт [1]. Впервые была реализована технология преобразования низкотемпературного тепла в электроэнергию с использованием органического цикла Ренкина. В дальнейшем бинарные энерготехнологии на низкипящих рабочих телах получили широкое распространение за рубежом для утилизации тепла геотермальных ресурсов и сбросного теплоносителя промышленных предприятий. К сожалению, после этого в нашей стране, обладающей огромными запасами углеводородного топлива, технологии геотермальной электрогенерации долгое время оставались невостребованными.

Новый этап развития российской геотермальной электроэнергетики начался в 1989 году, когда в рамках реализации ГНТП Миннауки РФ «Экологически чистая энергетика» под руководством д.т.н. проф. МЭИ Поварова О.А. были возобновлены научно-технические исследования и разработки по созданию отечественного геотермального энергетического оборудования. В течение 10-15 лет совместными усилиями АО «Наука», ООО «Геотерм-ЭМ», научно-исследовательского и учебного центра геотермальной энергетики (НУЦ Гео) Московского энергетического института, Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного и энергетического машиностроения (ВНИИАМ) и других научных организаций был выполнен комплекс фундаментальных исследований в области геотермальной энергетики, включая:

- разработку ряда лабораторных и натуральных экспериментальных стендов, установок и приборов;
- проведение физико-химических исследований геотермального теплоносителя, течения многофазных и многокомпонентных сред, закономерностей эрозивно-коррозионного воздействия на металл геотермального энергетического оборудования;
- разработку технологии и уникального оборудования для геотермальных электростанций, работающих на пароводяном теплоносителе.

В результате сформировалась российская научная школа д.т.н. Поварова О.А., были разработаны и созданы новые российские ГеоЭС на Камчатке и Курильских островах, за что в 2003 г. Поварову О.А. и коллективу ученых и специалистов была присуждена Госпремия РФ по науке и технике.

Силами ученых и инженеров АО «КТЗ», АО «Наука», НУЦ Гео МЭИ, ООО «Геотерм-ЭМ», ВНИИАМ, ЭНИН и других российских организаций было разработано уникальное оборудование для Верхне-Мутновской ГеоЭС мощностью 12,0 МВт (пущена на Камчатке в эксплуатацию в 1999 году), включая турбоагрегаты мощностью по 4,0 МВт с системой внутриканальной сепарации и регули-

рующей расход пара поворотной заслонкой типа «бабочка»; уникальные сепараторы, расширители и паросборники горизонтального типа с новым принципом гравитационного осаждения жидких частиц; воздухоохлаждаемые конденсаторы поверхностного типа. Этот опыт был использован при разработке и создании оборудования флагмана российской геотермальной электроэнергетики – Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт с двумя энергоблоками по 25 МВт каждый.

Ученые научной школы геотермальной электроэнергетики, созданной Поваровым О.А. (д.т.н. Томаров Г.В., к.т.н. Никольский А.И., к.т.н. Семенов В.Н., к.т.н. Шипков А.А. и другие специалисты, объединившиеся с 2007 г. в научно-технической компании ООО «Геотерм-М»), продолжили исследования в области геотермальных бинарных технологий с низкокипящим рабочим телом. Ими была разработана и рассчитаны параметры технологической схемы бинарного энергоблокомощностью 2,5 МВт для Паужетской ГеоЭС [20].

При поддержке Министерства образования и науки РФ ООО «Геотерм-М» (директор – д.т.н. Г.В.Томаров) выполнило комплекс научных исследований в области оптимизации технологии и выбора низкокипящего органического рабочего тела геотермальных бинарных энергоустановок [21]. Получены результаты исследований по повышению эффективности использования тепла геотермального теплоносителя различного температурного уровня (70, 120 и 180 оС) на основе применения мультикаскадных геотермальных энергокомплексов [22, 23], а также путем использования водородно-кислородных парогенераторов для перегрева пара вторичного вскипания [24]. Кроме того, наряду с осуществлением научно-технического сопровождения ГеоЭС на Камчатке, разработаны технические предложения и технико-экономические обоснования по модернизации действующих Верхне-Мутновской ГеоЭС и Мутновской ГеоЭС путем их расширения паровыми турбинами на паре вторичного вскипания и бинарными энергоблоками на основе утилизации сбросного геотермального теплоносителя без бурения дополнительных скважин [25]. Эти разработки должны лечь в основу дальнейшего развития отечественных технологий геотермальной электрогенерации.

В советское время ведущей научной школой геотермального теплоснабжения была дагестанская. В восьмидесятых годах прошлого века в НПО «Союз-геотерм» коллектив ученых и инженеров во главе с к.т.н. М.М. Алиевым создал геотермальные системы, в том числе с реинжекцией отработанного теплоносителя, использованием геотермальной воды двух разных геологических пластов, тепловыми насосами [1]. Результатом работы украинской научной школы под руководством д.т.н. Ю.П. Морозова было сооружение нескольких геотермальных систем теплоснабжения (ГСТ), в Крыму, в том числе с использованием отсепарированного из геотермальной воды метана для электрогенерации и пикового подогрева теплоносителя [2].

В постсоветское время дагестанскую научную геотермальную школу возглавил и продолжает более 40 лет ею руководить д.т.н., проф. А.Б.Алхасов в Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики (ИПГиВЭ) ОИВТ РАН. В монографиях [10,11] д.т.н. А.Б. Алхасовым изложены результаты многолетних геотермальных исследований, в том числе по теплогенерации. В 2021

году по добыче геотермальной воды, установленной мощности ГСТ и реализации тепловой энергии Дагестан занимал второе место в РФ после Камчатки. Перспективы развития дагестанских ГСТ представлены в статьях [26, 27], а результаты разработок ГСТ ИПГиВЭ отмечены в сборнике докладов [12]. Р.М.Алиевым исследуются вопросы технологии геотермального бурения [28]. Подготовка бакалавров по геотермальной энергетике ведется в Дагестанском госуниверситете, а ученых в аспирантуре ИПГиВЭ.

Научной геотермальной школой д.т.н., проф. О.А.Поварова с 2008 года развивалось и геотермальное теплоснабжение [20]. Для поселка Розового Краснодарского края д.т.н. Г.В. Томаровым совместно с д.т.н. В.А.Бутузовым (ООО «Энерготехнологии-Сервис») в 2012 году была разработана и реализована I очередь ГСТ расчетной тепловой мощностью 5 МВт [29], особенностью которой является строение геотермального насосного модуля для стабилизации гидравлического режима работы скважины, геотермального центрального теплового пункта с гелиоустановкой для замещения скважины в межотопительный период [30]. Для пяти городов и населенных пунктов Краснодарского края были разработаны схемы перспективного геотермального теплоснабжения [20].

ГСТ с реинжекцией отработанного геотермального теплоносителя расчетной мощностью 7,5 МВт в 2015 году была разработана и построена на Ханкальском месторождении Чеченской Республики научным коллективом под руководством д.т.н. М.Ш.Минцаева, ныне ректора Грозненского нефтяного университета им. Акад. М.Д. Миллионщикова [31]. Особенностями этого комплексного проекта являлось моделирование геотермального месторождения [16, 32], дуплетное бурение двух скважин, в том числе наклонной для реинжекции, организация насосной и термосифонной циркуляции, геотермальная система отопления теплиц [33]. Результаты анализа современного опыта создания российских ГСТ приведены в статьях [29, 30].

3 Выводы

1. Геотермальная энергетика является одним из развивающихся сегментов ВЭ России, имеющим более чем столетнюю историю. Современная разведанная ресурсная база страны позволяет в разы увеличить мощности ГеоЭС и ГТС. В России работает несколько научных школ по изучению геотермальных ресурсов. Ведущими из них являются ИВиС ДВО РАН и ИПГиВЭ ОИВТ РАН. Моделирование разработки геотермальных месторождений реализовано при сооружении Ханкальской ГСТ.

2. Ученые научной школы геотермальной электроэнергетики, созданной д.т.н., профессором Поваровым О.А. в период разработки и сооружения российских геотермальных электростанций с 1996 по 2002 годы (Верхне-Мутновская ГеоЭС и Мутновская ГеоЭС), объединившиеся позднее в ООО «Геотерм-М» (директор - д.т.н., профессор Г.В.Томаров), продолжают выполнять исследования и разработки по совершенствованию действующих отечественных ГеоЭС и перспективных геотермальных энергоблоков с органическим циклом Ренкина.

3. В области геотермальной теплогенерации ведут исследования в основном д.т.н. В.А.Бутузов (ООО «Энерготехнологии-Сервис»), д.т.н. А.Б.Алхасов (ИП-ГиВЭ). Разработки поверхностных ГСТ выполняет д.т.н. Г.П.Васильев.

Литература

1. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бутузов, Г.В. Томаров, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // Теплоэнергетика, 2022. № 1. С.3-17.
2. Бутузов В.А. Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // Окружающая среда и энергоснабжение, 2019. № 3. С.4-21.
3. Маврицкий Б.Ф. Прогнозные запасы термальных вод СССР и возможные объемы геотермального теплоснабжения / Б.А. Локшин, А.В. Вольфенфельд. -М.: Наука, 1973. С.87-97.
4. Атлас карт ресурсов термальных вод СССР. -М.: Министерство геологии СССР; ВСЕГИНГЕО, 1984. 15 л.
5. Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр: монография. -М.: Спутник, 2018. 448 с.
6. Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. -М.: ИД «Граница», 2006, 173 с.
7. Васильев Г. П. Геотермальное теплоснабжение в Московском регионе / Г.П. Васильев, В.Д. Горнов и др. // Теплоэнергетика, 2008. № 1. С.85-96.
8. Кирюхин А.В. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения / А.В. Кирюхин, В.М. Сугробов // Вулканология и сейсмология, 2019. № 6. С.50-65.
9. Федоров С.А. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения / С.А. Федоров, В.М. Сугробов, И.С. Уткин, Л.И. Уткина // Вулканология и сейсмология, 2009, № 1. С.32-46.
10. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. -М.: Физматлит. 2008.
11. Алхасов А.Б. Освоение низкопотенциального геотермального тепла. -М.: Физматлит. 2017.
12. Алхасов А.Б. Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал объединенного института высоких температур РАН. Материалы XII Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». Материалы VI Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Выпуск 8. –Махачкала: Издательство «АЛЕФ». 2020. 530 с.
13. Кононов В.И. Геотермальные ресурсы России / В.И.Кононов, Б.Г.Поляк, М.Я. Хуторской // Георесурсы, 2005. № 2. С.29-33.
14. Гнатусь Н.А. Тепло «сухих» горных пород – неисчерпаемый источник энергии / Н.А. Гнатусь, М.Д. Хуторской // Литология и полезные ископаемые. 2010. № 6. С.662-670.

15. Хуторской М.Д. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика – мировые и отечественные тенденции развития / М.Д. Хуторской, В.Ю. Каримов, В.А.Косьянов. Учебное пособие. 2021. -М.: ФГБОУ ВО «МГРИ», 2021
16. Черкасов С.В. Методологические основы создания и эксплуатации природно-техногенных систем геотермальной энергетике: Автореф. дисс. докт. техн. наук по спец. 25.00.10. -М.: ФГБУН «ГГМ им. В.И.Вернадского», 2021. 44с.
17. Программа для термодинамического моделирования резервуара теплоэнергетических вод GEOTHERM / Н.А. Ваганова, М.Ю. Филимонов, С.В. Черкасов, М.Ш. Минцаев. Правообл.: ФГБУН «ГГМ им. В.И. Вернадского», ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д.Миллионщикова». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014616264. Дата рег.: 10.02.2014.
18. Шулюпин А.В. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов / А.В. Шулюпин, Н.Н. Варламова // Георесурсы, 2020. Т.22. № 24. С.113-122.
19. Шулюпин А.В. Способы обеспечения устойчивой работы пароводяных скважин // Георесурсы, 2019. Т. № 1. С.99-106.
20. Геотермальная энергетика: справочно-методическое издание / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков; под ред. П.П. Безруких. –М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015. 301 с.
21. Томаров Г.В. Выбор оптимального рабочего тела для бинарных установок на предельно низкотемпературном теплоносителе / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, Е.В. Сорокина // Теплоэнергетика, 2016. № 12. С.59-67.
22. Томаров Г.В., Шипков А.А. Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация среднетемпературного теплоносителя (120°C) // Теплоэнергетика, 2022. №5. С.49-57.
23. Томаров Г.В. Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180 °C) / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика, 2022. № 4. С.31-40.
24. Томаров Г.В. Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика, 2019. № 11. С.63-71.
25. Томаров Г.В. Геотермальные энерготехнологии России // Вестник МЭИ. 2020. №4. С.29-41.
26. Алхасов А.Б. Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского геотермального месторождения / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика, 2016. № 6. С.25-30.
27. Алхасов А.Б. Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод Юга России для тепло- водоснабжения и решения экологических проблем / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика, 2019. № 5. С.82-88.
28. Алиев Р.М. Техничко-экономические особенности строительства геотермальных скважин / Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов, А.М. Байрамов / Geoenergy. Чечня. Материалы международной конференции. 2015. С.14-22.
29. Бутузов В.А. Геотермальное теплоснабжение в России / В.А. Бутузов, Р.А. Амерханов, О.В. Григоращ // Теплоэнергетика, 2020. № 3. С.3-14.
30. Бутузов В.А. Геотермия Кубани, Ставрополя, Адыгеи и Карачаево-Черкессии // Энергия, 2021. № 3. С.48-59.
31. Минцаев М.Ш. Техничко-экономическое обоснование использования геотермальных ресурсов для отопления тепличных комплексов / М.Ш. Минцаев, Т.В. Якубов, М.А. Барзаева // Вестник газовой науки: научн.-техн. сб., 2021. № 4(49) С.176-183.

32. Минцаев М.Ш. Разработка ГИС-модуля для комплексного мониторинга геологической среды Ханкальского месторождения Чеченской Республики / М.Ш. Минцаев, Э.В. Эльсункаева // Мониторинг. Наука и технологии, 2021. №3(49). С.51-56.
33. Минцаев М.Ш. Автоматизированная система управления Ханкальской геотермальной станцией с циркуляционной системой отбора глубинного тепла земли – образовательный аспект / М.Ш. Минцаев, З.Л. Хакимов, М.А.Лабазанов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: «Технические науки», 2022. №11 (213).С.31-37.

References

1. Geothermal energy in Russia: resource base, electric power industry, heat supply (review) / V.A. Butuzov, G.V. Tomarov, A.B. Alkhasov, R.M. Aliev, G.B. Badavov // Thermal power engineering, 2022. No. 1. P.3-17.
2. Butuzov V.A. Russian geothermal energy: an analysis of the centenary development of scientific and engineering concepts // Environment and Energy Science, 2019. No. 3. P.4-21.
3. Mavritsky B.F. Forecast reserves of thermal waters of the USSR and possible volumes of geothermal heat supply / B.A. Lokshin, A.V. Wolfenfeld. -M.: Nauka, 1973. S.87-97.
4. Atlas of maps of thermal water resources of the USSR. -M.: Ministry of Geology of the USSR; VSEGINGEO, 1984. 15 p.
5. Boguslavsky E.I. Mastering the thermal energy of the bowels: monograph. -M.: Sputnik, 2018. 448 p.
6. Vasiliev G.P. Heat supply of buildings and structures using low-potential thermal energy of the surface layers of the Earth. -M.: Publishing House "Border", 2006, 173 p.
7. Vasiliev G.P. Geothermal heat supply in the Moscow region / G.P. Vasiliev, V.D. Gornov and others // Thermal power engineering, 2008. No. 1. P. 85-96.
8. Kiryukhin A.V. Geothermal resources of Kamchatka and immediate prospects for their development / A.V. Kiryukhin, V.M. Sugrobov // Volcanology and seismology, 2019. No. 6. P.50-65.
9. Fedorov S.A. Possibilities of using the heat of the magma chamber of the Avachinsky volcano and its surrounding rocks for heat and power supply / S.A. Fedorov, V.M. Sugrobov, I.S. Utkin, L.I. Utkin // Volcanology and seismology, 2009, No. 1. P.32-46.
10. Alkhasov A.B. Geothermal energy: problems, resources, technologies. -M.: Fizmatlit. 2008.
11. Alkhasov A.B. The Institute of Geothermal Problems and Renewable Energy is a branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences. Proceedings of the XII School of Young Scientists. E.E. Shpilrain "Actual problems of development of renewable energy resources". Materials of the VI International Conference "Renewable Energy: Problems and Prospects". Issue 8. -Makhachkala: ALEF Publishing House. 2020. 530 p.
12. Kononov V.I. Geothermal resources of Russia / V.I. Kononov, B.G. Polyak, M.Ya. Khutorskoy // Georesources, 2005. No. 2. P.29-33.
13. Gnatus N.A. The heat of "dry" rocks is an inexhaustible source of energy / N.A. Gnatus, M.D. Khutorskoy // Lithology and minerals. 2010. No. 6. P.662-670.
14. Khutorskoy M.D. Renewable and non-traditional energy - global and domestic development trends / M.D. Khutorskoy, V.Yu. Karimov, V.A. Kosyanov. Tutorial. 2021. -M.: FGBOU VO "MGRI", 2021

15. Cherkasov S.V. Methodological foundations for the creation and operation of natural-technogenic systems of geothermal energy: Abstract of the thesis. diss. doc. tech. sciences on special 25.00.10. -M.: FGBUN "GGM im. V.I. Vernadsky", 2021. 44p.
16. Program for thermodynamic modeling of a reservoir of thermal power water GEOTHERM / N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov, S.V. Cherkasov, M.Sh. Mintshev. Copyright: FGBUN "GGM im. IN AND. Vernadsky", FGBOU VO "GGNTU im. acad. M.D. Millionshchikov. Computer program registration certificate RUS 2014616264. Registration date: 10.02.2014.
17. Shulyupin A.V. Modern trends in the development of geothermal resources / A.V. Shulyupin, N.N. Varlamov // Georesources, 2020. V.22. No. 24. P.113-122.
18. Shulyupin A.V. Ways to ensure sustainable operation of steam-water wells // Georesources, 2019. V. No. 1. P. 99-106.
19. Geothermal energy: reference and methodical publication / G.V. Tomarov, A.I. Nikolsky, V.N. Semenov, A.A. Shipkov; ed. P.P. Armless. -M.: Intekhenergo-Izdat; Teploenergetik, 2015. 301 p.
20. Tomarov G.V. Selection of the optimal working fluid for binary installations on an extremely low-temperature coolant / G.V. Tomarov, A.A. Shipkov, E.V. Sorokin // Thermal power engineering, 2016. No. 12. P.59-67.
21. Tomarov G.V., Shipkov A.A. Multicascade geothermal binary energy complexes: utilization of a medium-temperature heat carrier (120°C) // Teploenergetika, 2022. No. 5. pp.49-57.
22. Tomarov G.V. Multicascade geothermal binary energy complexes: utilization of high-temperature coolant (180 °C) / G.V. Tomarov, A.A. Shipkov // Thermal Power Engineering, 2022. No. 4. P. 31-40.
23. Tomarov G.V. Geothermal combined binary power plant with a system of superheating of secondary boiling steam: the choice of optimal working bodies / G.V. Tomarov, A.A. Shipkov // Thermal power engineering, 2019. No. 11. P.63-71.
24. Tomarov G.V. Geothermal energy technologies of Russia // Vestnik MPEI. 2020. №4. S.29-41.
25. Alkhasov A.B. Prospects for the development of high-temperature highly mineralized resources of the Tarumovsky geothermal deposit / A.B. Alkhasov, D.A. Alkhasova, A.Sh. Ramazanov, M.A. Kasparova // Thermal power engineering, 2016. No. 6. P.25-30.
26. Alkhasov A.B. Integrated use of low-potential thermal waters of the South of Russia for heat and water supply and solving environmental problems / A.B. Alkhasov, D.A. Alkhasova // Thermal power engineering, 2019. No. 5. P.82-88.
27. Aliev R.M. Technical and economic features of the construction of geothermal wells / R.M. Aliev, G.B. Badavov, A.M. Bayramov / Geoenergy. Chechnya. Materials of the international conference. 2015. P.14-22.
28. Butuzov V.A. Geothermal heat supply in Russia / V.A. Butuzov, R.A. Amerkhanov, O.V. Grigorash // Thermal Power Engineering, 2020. No. 3. P.3-14.
29. Butuzov V.A. Geothermy of Kuban, Stavropol, Adygea and Karachay-Cherkessia // Energy, 2021. No. 3. P.48-59.
30. Mintshev M.Sh. Feasibility study for the use of geothermal resources for heating greenhouse complexes / M.Sh. Mintshev, T.V. Yakubov, M.A. Barzaeva // Vestnik gazovoy nauki: nauchn.-tekhn. Sb., 2021. No. 4(49) P.176-183.
31. Mintshev M.Sh. Development of a GIS module for integrated monitoring of the geological environment of the Khankalskoye field of the Chechen Republic / M.Sh. Mintshev, E.V. Elsunkaeva // Monitoring. Science and technology, 2021. No. 3 (49). pp.51-56.
32. Mintshev M.Sh. Automated control system of the Khankala geothermal station with a circulating system for extracting the deep heat of the earth - an educational aspect /

33. M.Sh. Mintshev, Z.L. Khakimov, M.A. Labazanov // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Series: "Technical Sciences", 2022. No. 11 (213). P. 31-37.

Scientific Background of Geothermal Power and Heat Generation

Vitaly Butuzov^{1,3}, Elena Bryantseva^{2,4}

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

²ООО Energotechnologies-Service ltd., Krasnodar, Russia

E-mail: ³ets@nextmail.ru, ⁴ekoenergy@mail.ru

Abstract. In 2021, geothermal power generation in Russia had an installed capacity of 74 MW with an energy output of 280 GWh/year, geothermal heat generation was 110 MW and 428 GWh/year, respectively. The article indicates the number of geothermal deposits and exploited wells, describes the structure and principles of operation. The main results of the development of Soviet geothermal energy are considered. The results of research by Russian scientific organizations on deep and surface geothermy are presented. The prospects of research on the development and construction of wells with supercritical fluid parameters at the foot of volcanoes in Kamchatka are shown. The directions and the most important research results of the national scientific school of geothermal power generation are presented. The results of the work of Russian research organizations in the field of geothermal heat generation in the Krasnodar Territory, Chechnya and Dagestan are noted.

Keywords: renewable energy, WPP, SPP, small-scaled hydro PP, Geothermal PP, BioPP, renewable energy sources, auctions, "green" tariffs, geothermal deposit, deep and surface geothermy, GeoES, geothermal heat supply systems, steam and binary cycles, thermal distribution stations, geothermal central heating points.

Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России

Дегтярев Кирилл Станиславович^{[0000-0002-1738-6320]1,2},
Синюгин Олег Анатольевич^{[0000-0001-5874-4342]1,3}
Березкин Михаил Юрьевич^{[0000-0002-6945-2131]1,4}

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

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

Аннотация. В статье показана динамика становления российской нормативной базы, связанной переходом к низкоуглеродному развитию. Рассмотрены основные существующие на данный момент в России финансовые инструменты, призванные стимулировать развитие зелёной экономики, такие как углеродные единицы – результат реализации климатических проектов, зелёные сертификаты в энергетике и зелёные облигации, привлекаемые для финансирования проектов, имеющих экологические цели и задачи. Оценены перспективы и сложности развития рынка зелёных инструментов в России.

Ключевые слова: низкоуглеродное развитие в России, климатические проекты, углеродные единицы, зелёные сертификаты, зелёные облигации, возобновляемая энергетика.

1 Введение. Меры, направленные на переход к низкоуглеродному развитию

Меры, направленные на переход экономики России к низкоуглеродному развитию, можно с определённой долей условности, разделить на две категории – законодательно-нормативные и рыночно-финансовые.

В первом случае речь идёт о нормативно-правовой базе – законах, указах, постановлениях, направленных на ограничение выбросов парниковых газов (ПГ) и загрязнение воздуха, обязательных к исполнению для органов власти и хозяйствующих субъектов.

Во втором случае речь идёт о добровольных опциях по снижению выбросов ПГ для хозяйствующих субъектов и граждан, использование которых может принести им дополнительные выгоды – материального, репутационного или какого-либо иного характера.

Второе, в свою очередь, вытекает из первого, поскольку налаживание рыночных механизмов также требует предварительного правового оформления.

Законодательство, направленное на предотвращение загрязнения воздуха, в России разрабатывается достаточно давно. В частности, Закон об охране атмосферного воздуха, где вводились понятия контроля загрязнения и предельно допустимой концентрации (ПДК) загрязняющих веществ, был принят в СССР в 1980 году [1], а уже постсоветская его версия – российский Федеральный закон, также «Об охране атмосферного воздуха» [2], где также вводится плата за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух (ст. 28) – в 1999 году.

В дальнейшем нормативная база, связанная с контролем состава и качества атмосферного воздуха, следовала в мировом экологическом тренде и, прежде всего, его составляющей, связанной с декарбонизацией – мерами по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу в контексте сдерживания изменений климата.

Так, в 2006 году Правительством России было принято распоряжение «О создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов...» [3].

Основная цель распоряжения состоит в создании национального кадастра выбросов парниковых газов (далее ПГ) и объёмов их поглощения. Отчет о ПГ на уровне государства составляется Росгидрометом и Институтом глобального климата и экологии РАН имени академика Ю.А. Израэля на основе данных государственной статистики. Он ежегодно предоставляется в соответствии с международными требованиями и процедурами руководящих принципов МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата; IPCC) 2006 года в комитет Рамочной конвенции ООН об изменении климата как подтверждение обязательств государства по регулированию выбросов ПГ и для оценки проводимой внутри страны климатической политики. В 2015 году Минприроды своим распоряжением утвердило методические рекомендации по инвентаризации выбросов парниковых газов по регионам России [4]. Предполагалось, что субъекты РФ проводят инвентаризацию выбросов и предоставляют отчёты о выбросах на добровольной основе.

Также в 2009-2015 гг. была разработана основная нормативная база для поддержки и развития возобновляемой энергетики, которую можно рассматривать как ключевой инструмент декарбонизации, однако этот вопрос требует отдельного рассмотрения и не входит в данный обзор.

Разработка нормативной базы в сфере декарбонизации и, в целом, интенсификация движения в данном направлении, произошла с присоединением России к Парижскому соглашению в 2019 году.

2 Переход к декарбонизации в России после принятия Парижского соглашения

Парижское межгосударственное соглашение [5] было принято на 6-й международной конференции ООН по климату 12 декабря 2015 года и вступило в силу 4 ноября 2016 года. Заключение соглашения произошло в развитие идей Рамочной конвенции ООН об изменении климата от 09.05.1992 и вместо завершившего срок действия Киотского протокола. Парижское соглашение не содержит обязательств сторон по количественным показателям сокращения эмиссии парниковых газов. Стороны обязуются прилагать усилия к ограничению роста средней глобальной температуры до показателя не выше 1,50С относительно доиндустриального уровня. Основное направление усилий – снижение выбросов CO₂ в атмосферу. В соответствии с соглашением, стороны должны разработать к 2020 году национальные стратегии перехода к безуглеродной экономике.

После присоединения России к Парижскому соглашению был принят ещё ряд документов [6], ключевым из которых стали указ президента о сокращении выбросов ПГ [7], Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики [8] и Федеральный закон об ограничении выбросов ПГ [9]. Анализ Стратегии приводится в [6].

Несмотря на обострение отношений с западными странами с февраля 2022 года курс на низкоуглеродное развитие сохраняется. Принимаются дополнительные меры стимулирования к низкоуглеродному развитию. Принят ряд постановлений уже в марте – мае 2022 года. В основном они связаны с реализацией климатических проектов и углеродным регулированием [10; 11; 12; 13].

В качестве основных рыночных и финансовых механизмов, принятых в последние годы и стимулирующих переход к низкоуглеродному пути развития на добровольной основе, следует упомянуть климатические проекты, зелёные сертификаты и зелёные облигации – такие же или сходные инструменты в последние 1-2 десятилетия используются в западных странах.

3 Климатические проекты

Под климатическим проектом (КП) понимается комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов ПГ или увеличение поглощения ПГ [14]. Основные постулаты, связанные с КП, определены в ст. 9 ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [9]. Критерии, по которым проект можно отнести к климатическим, обозначены в приказе Минэкономразвития, принятом в мае 2022 года [15] и вступившим в силу в сентябре 2022 года. Главное, что следует отметить:

- КП должен не противоречить закону, осуществляться в соответствии с документами национальной системы стандартизации в области ограничения выбросов парниковых газов [16; 17] и не входить в число обязательных предусмотренных законом мероприятий (может быть дополнительным по отношению к ним);
- КП не должен приводить к увеличению нетто-выбросов ПГ за пределами места реализации проекта, а также не должен являться следствием сокращения производства;
- Сокращение нетто-выбросов парниковых газов на данной территории по итогам проекта должно быть связано именно с реализацией данного КП, а не другими причинами, не имеющими к нему отношения.

К категории КП можно отнести широкий спектр мероприятий, включающий экономию ресурсов и энергосбережения, создание систем улавливания ПГ, строительство энергетических станций, работающих на неуглеродном топливе, восстановление леса. К климатическим проектам относятся проекты в области низкоуглеродной энергетики, экономии ресурсов, эффективного обращения с отходами, устойчивого сельского хозяйства, а также лесовосстановительные проекты.

Конечным результатом для инициатора и выгодоприобретателя КП является выпуск углеродных единиц. 1 углеродная единица эквивалентна 1 тонне углекислого газа – иными словами, инициатор КП становится обладателем 1 углеродной единицы, если в результате реализации КП годовые нетто-выбросы ПГ были снижены на величину, равную 1 тонне эквивалента углекислого газа. Углеродная единица является ценной бумагой, которую обладатель может выставлять на биржевые торги. Также в дальнейшем обладатель углеродных единиц может зачесть их в сокращение собственного углеродного следа. Согласно ст. 9 ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [9], реализовать КП может любое юридическое лицо, индивидуальный предприниматель и физическое лицо. Критерии отнесения проектов к климатическим устанавливаются уполномоченным федеральным органом исполнительной власти – Минэкономразвития России. В свою очередь, аккредитованные в Федеральной службе по аккредитации (Росаккредитация) лица проводят валидацию – процесс проверки проекта на соответствие общим критериям КП.

По состоянию на конец 2022 года в реестре Росаккредитации значится 10 таких организаций.

Для регистрации КП и создаваемых по итогам его реализации углеродных единиц создан Реестр углеродных единиц [14], управляемый оператором, в качестве которого выступает АО «Контур», действующий при поддержке Газпромбанка и Московской биржи [18].

Регистрация и реализация КП для инициатора включает следующие стадии [19]:

- 1) Подготовка проектной документации;
- 2) Проверка проекта валидатором;
- 3) Заключение договора с оператором реестра углеродных единиц (в личном кабинете Единого портала государственных услуг);
- 4) Регистрация КП;
- 5) Реализация КП;
- 6) Подготовка и верификация отчёта по проекту (в качестве верификаторов также выступают лица, аккредитованные в Росаккредитации);
- 7) Выпуск углеродных единиц и зачисление их на счёт инициатора проекта.

По ситуации на середину 2023 года в реестре углеродных единиц зарегистрировано 5 климатических проектов, выпущено 96 углеродных единиц, подлежит выпуску 453 797 углеродных единиц.

На данный момент известен 1 реализованный и верифицированный климатический проект – в Сахалинской области, инициатором которого стала компания ООО «ДальЭнергоИнвест», построившая солнечную станцию мощностью 250 кВт [20]. По итогам проекта были выпущены упомянутые выше 96 углеродных единиц. 26 сентября 2022 года на Национальной товарной бирже (входит в группу Московской биржи) прошли первые торги углеродными единицами, выставленными инициатором проекта, в ходе которых было продано 20 единиц, а средневзвешенная цена единицы составила 1000 рублей.

Таким образом, первый КП в России прошёл полный цикл реализации, а инфраструктура их реализации продемонстрировала свою работоспособность. В то же время очевидно, что потенциальное количество и масштаб потенциальных КП в России существенно выше – в частности, речь может идти о многих гигаваттах построенных и уже строящихся электростанций, работающих на неуглеродном топливе, производствах биотоплива, проектах сохранения и восстановления лесов. В то же время, по отзывам экспертов, на данный момент сравнительно невелика заинтересованность в обладании углеродными единицами, поскольку отчётность регионов и предприятий по выбросам ПГ в России на данный момент носит рекомендательный, а не обязательный характер. В итоге, пока обладатель углеродных единиц получает, главным образом, имиджевые выгоды, а также создаёт себе возможный задел на будущее.

4 Зеленые сертификаты

Низкоуглеродные, или «зелёные», сертификаты, они же сертификаты источников происхождения энергии, непосредственно связаны с производством электроэнергии. Это электронный документ, выдаваемый по факту производства электроэнергии на объектах с низким углеродным следом – солнечной, ветровой, гидро- или атомной станции. Потребитель энергии может приобрести у генератора энергии зелёный сертификат в качестве подтверждения использования им «зелёной» электроэнергии – по сути, заключить прямой договор поставки электроэнергии (рис. 1).



Рис. 1. Схема договора поставки «зелёной» энергии производителем потребителю. [21]

В то же время, это не является физической поставкой потребителю энергии с данной электростанции. Зелёный сертификат имеет ограниченный срок действия и, так же, как углеродная единица, свободно обращается на рынке, переходя от одного владельца к другому. Если углеродная единица по своей сути можно рассматривать как акцию, то зелёный сертификат является своего рода векселем.

Для производителей «зелёной» энергии зелёные сертификаты - дополнительный инструмент привлечения средств и реализации новых проектов. Для потребителя это документ об отсутствии углеродного следа при производстве своей продукции – в последние годы в России это имело смысл, главным образом, для предприятий, ориентированных на экспорт продукции, прежде всего, в западноевропейские страны, где вводится трансграничное углеродное регулирование.

В России возможность покупки зелёных сертификатов появилась в 2020 году с приходом международного аккредитованного центра выпуска зелёных сертификатов I-REC [22]. К октябрю 2021 года было выпущено 2,5 млн. сертификатов стандарта I-REC на 125 млн рублей. Один из крупнейших игроков на рынке — петербургское ПАО «ТГК-1», работавшее через торговую площадку «Газпромбанка» [23].

В связи с геополитическим обострением 2022 года I-REC и другие западные игроки ушли с российского рынка, что означает для России либо отказ от использования зелёных сертификатов, либо создание собственной системы. Был выбран второй вариант.

Законодательство и инфраструктура, связанные с выпуском и оборотом зелёных сертификатов, в настоящее время находятся в разработке, хотя первые законопроекты по данному вопросу были предложены в 2020 году.

В ноябре 2022 года Дума приняла в первом чтении правительственные поправки в закон «Об электроэнергетике» в связи с введением в гражданский оборот зелёных сертификатов, подтверждающих факт производства электроэнергии на генерирующем объекте с использованием возобновляемых источников. [24]. В соответствии с законопроектом зелёный сертификат является электронным документом, выдаваемым по факту производства электроэнергии с использованием ВИЭ на квалифицированном генерирующем объекте в количестве и в течение периода времени, указанных в нём.

Выдачу зелёных сертификатов будет осуществлять Совет рынка [25] в добровольном порядке по заявлению владельца квалифицированного генерирующего объекта на основе ВИЭ, введенном в эксплуатацию после 2024 года в рамках механизма стимулирования использования ВИЭ на оптовом рынке. Совет рынка будет также вести соответствующий реестр. Зелёные сертификаты могут свободно отчуждаться и переходить от одного лица к другому до погашения или истечения срока действия. В настоящее время законопроект проходит дальнейшие стадии рассмотрения и утверждения [26].

Что касается запуска отечественной системы сертификации, то, по данным Минэнерго России, он ожидается в конце 2023 года, а в настоящее время она работает в тестовом режиме [27].

В то же время, в случае с зелёными сертификатами в ближайшие годы также может складываться ситуация недостаточной заинтересованности хозяйствующих субъектов и физических лиц в этом инструменте из-за отсутствия прямых материальных стимулов их приобретения.

5 Зеленые облигации

В случае с «зелёными» облигациями финансовый смысл тот же, что у «обычных» облигаций – они представляют собой долговые обязательства с фиксированным доходом и являются способом привлечения финансирования в проекты, имеющие экологическую значимость, в том числе и связанные с низкоуглеродной энергетикой.

Предполагается, что эмитент облигаций направляет привлечённые средства на природоохранные проекты: развитие возобновляемой энергетики, сохранение биоразнообразия, рекультивацию земель, строительство комплексов по переработке отходов, внедрение электротранспорта, совершенствование очистных сооружений, адаптацию к изменению климата и т.п.

В качестве эмитентов облигаций могут выступать как органы государственного управления, так и корпорации. В свою очередь, приобретателями зелёных облигаций могут быть и юридические, и физические лица.

Так же, как в случае с климатическими проектами и зелёными сертификатами, для эмиссии зелёных облигаций требуется подтверждение соответствия проекта определённым критериям.

Основополагающий нормативный акт на данный момент – постановление правительства России, принятое в сентябре 2021 года об утверждении критериев проектов устойчивого развития в России [28].

В качестве компаний – верификаторов, подтверждающих соответствие проекта определённым критериям, выступают рейтинговые агентства, аудиторские или иные компании; перечень верификаторов приведён, в частности, в [29].

В то же время, практика эмиссии и оборота зелёных облигаций в России опережает разработку нормативной и инфраструктурной базы.

Первый их выпуск состоялся в 2018 году, когда компания «Ресурсосбережение ХМАО» разместила на Московской бирже облигации на сумму 1,1 млрд. рублей. [30]. Средства привлекались на создание межмуниципального полигона для размещения, обезвреживания и обработки твердых коммунальных отходов в Нефтеюганском районе. В 2019 году они попали в международный реестр Environmental Finance Bond Database и в базу Green, Social and Sustainability Bond Database.

Первой российской компанией, разместившей зелёные облигации на внешнем рынке, объёмом 500 млн. евро, стала РЖД в мае 2019 года. Целью было финансирование кредитов, привлечённых на покупку электровозов и пассажирских поездов «Ласточка».

Летом 2019 года на Московской бирже появился сектор «Устойчивое развитие» [31], включающий торги зелёными и социальными облигациями. Весной 2021 года на бирже также впервые были размещены зелёные облигации правительства Москвы на сумму 70 млрд. рублей. Средства предполагалось направить на замену автобусного парка Москвы на электробусы, реставрацию и строительство станций метро.

6 Выводы

В России осуществляется переход к низкоуглеродному развитию, в рамках которого идёт разработка нормативной базы и инфраструктуры, активизировавшаяся после присоединения России к Парижскому соглашению.

Меры перехода к низкоуглеродному развитию можно разбить на две основные группы: 1) нормативные документы, направленные на регулирование эмиссии парниковых газов, имеющие директивный характер; 2) финансово-рыночные инструменты, представляющие собой добровольные опции для органов управления, бизнеса и населения по привлечению средств в проекты, связанные со снижением выбросов парниковых газов, и извлечению выгод от их реализации.

Среди основных инструментов второй группы – климатические проекты, сертификаты происхождения источника энергии (зелёные сертификаты) и облигации проектов устойчивого развития (зелёные облигации). Углеродные единицы, как итог реализации климатического проекта, зелёные бумаги и зелёные сертификаты представляют собой ценные бумаги, обращающиеся на бирже. Их эмитентами являются инициаторы проектов, имеющих экологические цели, для которых бумаги являются источником финансирования.

Практика использования этих инструментов в России (с 2018-2020 гг.) несколько опережала развитие соответствующего законодательства и инфраструктуры – на первых этапах использовались зарубежные площадки и системы верификации бумаг. В значительной степени появление этих инструментов было обусловлено ориентацией крупных экспортёров на внешние, прежде всего, западно-

европейские, рынки. В настоящее время стоит задача развития собственных систем. На данный момент самым существенным препятствием для этого является отсутствие у компаний и физических лиц прямых материальных стимулов использования данных инструментов.

Литература

1. Закон СССР от 25 июня 1980 года №2353-Х «Об охране атмосферного воздуха»
2. Федеральный закон от 04.05.1999 №96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха»
3. Распоряжение Правительства РФ № 278-р от 01.03.2006 «О создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в Монреале 16.09.1987»
4. Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 № 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации»
5. The Paris Agreement. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
6. Дегтярёв К. С., Соловьев Д. А., Березкин М. Ю. Подходы к оценке затрат на переход к низкоуглеродному развитию в России // Энергетическая политика. — 2023. — № 6. — С. 100–110.
7. Указ Президента РФ от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов».
8. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 года № 3052-р.

9. Федеральный закон от 02.07.2021 N 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».
10. Постановление Правительства РФ от 24.03.2022 № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов».
11. Постановление Правительства РФ от 30.03.2022 № 518 «О порядке определения платы за оказание оператором услуг по проведению операций в реестре углеродных единиц».
12. Постановление Правительства РФ от 30.04.2022 № 790 «Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведения операций с углеродными единицами в реестре углеродных единиц» (действует до 31.08.2028)
13. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (вступил в силу с 01.03.2023).
14. Реестр углеродных единиц. URL: <https://carbonreg.ru/ru/>
15. Приказ Минэкономразвития России от 11.05.2022 N 248 "Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта».
16. ГОСТ Р ИСО 14080-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Управление парниковыми газами и связанные виды деятельности. Система подходов и методическое обеспечение реализации климатических проектов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181057>
17. Реестр утвердит до конца года 12 стандартов по ограничению выбросов парниковых газов. URL: <https://tass.ru/ekonomika/15703413>
18. В России зарегистрированы первые углеродные единицы, выпущенные от климатического проекта. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_zaregistrovali_pervye_uglerodnye_edinicy_vypushchennye_ot_klimaticheskogo_proekta.html#:~:text=Оператором%20реестра%20углеродных%20единиц%20выступает,частью%20инфраструктуры%20рынка%20углеродных%20единиц
19. Реестр углеродных единиц. URL: <https://carbonreg.ru/pdf/Реестр%20углеродных%20единиц.pdf?v=1.2>
20. В России зарегистрировали первые углеродные единицы, выпущенные от климатического проекта. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_zaregistrovali_pervye_uglerodnye_edinicy_vypushchennye_ot_klimaticheskogo_proekta.html#:~:text=Оператором%20реестра%20углеродных%20единиц%20выступает,частью%20инфраструктуры%20рынка%20углеродных%20единиц
21. Поставка зелёной электроэнергии. URL: <https://apsbt.ru/uslugi/postavka-zelyenoy-elektroenergii/>
22. The I-REC Standard Foundation. URL: <https://www.irecstandard.org/>.
23. Бизнес переходит на «зеленую» энергию: тренд или необходимость URL: <https://nsk.rbc.ru/nsk/21/10/2021/6170b0549a79478a82513ffb>.

24. Госдума одобрила зелёные сертификаты в электроэнергетике. URL: <https://1prime.ru/energy/20221117/838856557.html>.
25. Ассоциация «НП Совет рынка». URL: <https://www.np-sr.ru/>.
26. Законопроект № 196167-8 О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике". URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/196167-8>.
27. Андрей Максимов: Запуск системы «зелёных» сертификатов в России запланирован на конец года. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/24281>.
28. Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2021 г. № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации».
29. Перечень верификаторов. URL: <https://вэб.пф/ustojchivoe-razvitie/zeljonoefinansirovanie/perechen-verifikatorov/>.
30. Что такое «зелёные» облигации. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60ddcae59a79476590c44ef6>.
31. Сектор устойчивого развития Московской биржи. URL: <https://www.moex.com/s3019>.

References

1. Zakon SSSR ot 25 iyunya 1980 goda 2353-X «Ob oxrane atmosfernogo vozduxa»
2. Federalnyj zakon ot 04.05.1999 96-FZ «Ob oxrane atmosfernogo vozduxa»
3. Rasporyazhenie Pravitelstva RF 278-r ot 01.03.2006 «O sozdanii rossijskoj sistemy ocenki antropogennyx vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyx gazov ne reguliruemyx Monrealskim protokolom po veshhestvam razrushayushhim ozonovyj sloj prinyatym v Monreale 16.09.1987»
4. Rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 16.04.2015 15-r «Ob utverzhenii metodicheskix rekomendacij po provedeniyu dobrovolnoj inventarizacii obema vybrosov parnikovyx gazov v subektax Rossijskoj Federacii»
5. The Paris Agreement. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
6. Degtyaryov K. S. Solovov D. A. Berezkin M. Yu. Podxody k ocenke zatrat na perexod k nizkouglerodnomu razvitiyu v Rossii E"nergeticheskaya politika. — 2023. — 6. — S. 100–110.
7. Ukaz Prezidenta RF ot 4 noyabrya 2020 g. 666 «O sokrashhenii vybrosov parnikovyx gazov».
8. Strategiya socialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyx gazov do 2050 goda. Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 29 oktyabrya 2021 goda 3052-r.
9. Federalnyj zakon ot 02.07.2021 N 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyx gazov».
10. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 24.03.2022 455 «Ob utverzhenii Pravil verifikacii rezultatov realizacii klimaticheskix proektov» (dejstvuet do 31.08.2028)
11. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 30.03.2022 518 «O poryadke opredeleniya platy za okazanie operatorom uslug po provedeniyu operacij v reestre uglerodnyx edinic».
12. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 30.04.2022 790 «Ob utverzhenii Pravil sozdaniya i vedeniya reestra uglerodnyx edinic a takzhe provedeniya operacij s uglerodnymi edinicami v reestre uglerodnyx edinic» (dejstvuet do 31.08.2028)
13. Prikaz Ministerstva prirodnyx resursov i ekologii RF ot 27.05.2022 371 «Ob utverzhenii metodik kolichestvennogo opredeleniya obemov vybrosov parnikovyx gazov i pogloshhenij parnikovyx gazov» (vstupil v silu s 01.03.2023).

14. Reestr uglerodnyx edinic. URL: <https://carbonreg.ru/ru/>
15. Prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 11.05.2022 N 248 Ob utverzhdenii kriteriev i poryadka otneseniya proektov realizuemyx yuridicheskimi licami individualnymi predprinimateljami ili fizicheskimi licami k klimaticheskim proektam formy i poryadka predstavleniya otcheta o realizacii klimaticheskogo proekta».
16. GOST R ISO 14080-2021. Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii. Upravlenie parnikovymi gazami i svyazannye vidy deyatelnosti. Sistema podxodov i metodicheskoe obespechenie realizacii klimaticheskix proektov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181057>.
17. Rosstandart utverdit do konca goda 12 standartov po ogranicheniyu vybrosov parnikovyx gazov. URL: <https://tass.ru/ekonomika/15703413>.
18. V Rossii zaregistrirovany pervye uglerodnye edinicy vypushchennye ot klimaticheskogo proekta. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_zaregistrirovali_pervye_uglerodnye edinicy_vypushchennye_ot_klimaticheskogo_proekta.html#:~:text=Оператором%20реестра%20углеродных%20единиц%20выступает,частью%20инфраструктуры%20рынка%20углеродных%20единиц.
19. Reestr uglerodnyx edinic. URL: <https://carbonreg.ru/pdf/Реестр%20углеродных%20единиц.pdf?v=1.2>.
20. V Rossii zaregistrirovali pervye uglerodnye edinicy vypushchennye ot klimaticheskogo proekta. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_zaregistrirovali_pervye_uglerodnye edinicy_vypushchennye_ot_klimaticheskogo_proekta.html#:~:text=Оператором%20реестра%20углеродных%20единиц%20выступает,частью%20инфраструктуры%20рынка%20углеродных%20единиц.
21. Postavka zelyonoy elektroenergii. URL <https://sapsbt.ru/sluzhba-postavka-zelyonoy-elektroenergii>
22. The I-REC Standard Foundation. URL: <https://www.irecstandard.org/>.
23. Biznes perexodit na «zelenuyu» energiyu trend ili neobxodimost. URL <https://nsk.rbc.ru/nsk/21/10/2021/6170b0549a79478a82513ffb>.
24. Gosduma odobrila zelyonye sertifikaty v elektroenergetike. URL: <https://lprime.ru/energy/20221117/838856557.html>.
25. Associaciya «NP Sovet rynka». URL: <https://www.np-sr.ru/ru>.
26. Zakonoproekt 196167-8 O vnesenii izmenenij v Federalnyj zakon Ob elektroenergetike. URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/196167-8>.
27. Andrej Maksimov Zapusk sistemy «zelyonyx» sertifikatov v Rossii zaplanirovan na konec goda. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/24281>.
28. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 21 sentyabrya 2021 g. 1587 «Ob utverzhdenii kriteriev proektov ustojchivogo (v tom chisle zelenogo) razvitiya v Rossijskoj Federacii i trebovanij k sisteme verifikacii proektov ustojchivogo (v tom chisle zelenogo) razvitiya v Rossijskoj Federacii».
29. Perechen verifikatorov. URL: <https://вэб.пф/ustojchivoe-razvitie/zelyonoe-finansirovanie/perechen-verifikatorov/>.
30. Chto takoe «zelyonye» obligacii. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60ddcae59a79476590c44ef6>.
31. Sektor ustojchivogo razvitiya Moskovskoj birzhi. URL: <https://www.moex.com/s3019>.

Development of financial and market instruments of low-carbon development in Russia

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

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

Abstract. The article shows the dynamics of the formation of the Russian regulatory framework associated with the transition to low-carbon development. There are considered the principal financial instruments currently existing in Russia designed to stimulate the development of a green economy, such as carbon units - the result of the implementation of climate projects, green certificates in the energy sector and green bonds attracted for financing projects with environmental goals and objectives. The work evaluates prospects and difficulties of the development of the green instruments market in Russia.

Keywords: low-carbon development in Russia, climate projects, carbon units, green certificates, green bonds, renewable energy.

О физической причине Североатлантической мультидекадной осцилляции

Фёдоров Валерий Михайлович^{[0000-0003-2305-7408]1,2},
Залиханов Алим Михайлович^{[0000-0002-2540-6045]1,3},
Фёдорова Екатерина Валерьевна^{[0000-0001-8054-2763]1,4}

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

E-mail: ²fedorov.msu@mail.ru, ³bulungu@yandex.ru,
⁴fedorov.msu@mail.ru

Аннотация. Показано, что Североатлантическая осцилляция соответствует разности рассчитанных на основе регрессионной модели значений приповерхностной температуры воздуха с инсоляционной контрастностью в качестве предиктора и фактических значений приповерхностной температуры воздуха. Этим доказывается гравитационная природа Североатлантической осцилляции. Показано, что периодичность Североатлантической осцилляции может быть результатом синхронизации и резонансного усиления 60-ти летней периодичности генерируемой в окружающем Землю пространстве соизмеримостью в средних движениях планет – гигантов: Юпитера и Сатурна.

Ключевые слова: Североатлантическая осцилляция, инсоляционная контрастность, регрессионная модель, соизмеримость, орбитальный резонанс, приливные неравенства.

1 Введение

Североатлантическая осцилляция (Atlantic multidecadal oscillation – AMO) – колебание, отражающее периодическую изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике, была обнаружена в 1994 году М. Шлезингером и Н. Раманкутти [1]. Эти колебания с периодом в среднем около 65 – 70 лет подтверждаются историческими наблюдениями и модельными расчетами [2; 3; 4; 5]. Однако, единства мнений относительно амплитуды и генезиса этого явления в настоящее время не существует. Оценкой Североатлантической осцилляции является индекс AMO, представляющий собой аномалию температуры поверхности океана в этом районе относительно среднего значения за период с 1951 по 1980 гг. [6]. Отмечается корреляция температуры воздуха, атмосферных осадков и активности ураганов с индексом Североатлантической осцилляции на значительной части Северного полушария [7; 8; 9; 10]. Моделирование и прогнозирование изменения климата требует знания пространственных и временных особенностей Североатлантической осцилляции и характера образующих ее факторов. Целью работы является исследование амплитудно-периодических характеристик, физической природы и возможных причин Североатлантической осцилляции.

2 Моделирование температуры поверхности океана и Североатлантическая осцилляция

Ранее нами выполнены расчеты облучения Земли с высоким пространственным и временным разрешением [11; 12; 13]. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-406) для верхней границы атмосферы (или поверхности Земли без учета атмосферы) в интервале от 3000 г. до н.э. до 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 (Coordinate Time) и всемирного корректируемого времени (Universal Time). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом Geodetic Reference System 1980 (GRS80) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 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 ма-

лой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ_1, φ_2 – географические широты, выраженные в радианах; $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($\text{Вт}/\text{м}^2$), 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. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [14]. На основе полученных данных рассчитывался годовой меридиональный градиент инсоляции, регулирующий интенсивность переноса радиационного тепла в системе океан – атмосфера [15]. В качестве характеристики годового МГИ принималась инсоляционная контрастность (ИК). Для полушарий годовая ИК рассчитывалась, по полученным значениям инсоляции, как разность солнечной радиации, приходящей в широтную область 0° – 45° (источник тепла) и 45° – 90° (сток тепла) за год [16]. По ансамблю линейного и полиномиального (полином второй степени) решений полученных по регрессионной модели с ИК в качестве предиктора были рассчитаны значения аномалии ТПО и ПТВ (приповерхностная температура воздуха). Сравнение рассчитанных и фактических значений аномалии ПТВ Земли и аномалии ТПО показывает, что существуют группы фактических значений аномалии (продолжительностью в среднем около 30 лет на интервале 1900 – 2016 гг.), расположенные либо выше рассчитанных значений аномалии, либо ниже [17]. Отмеченные для ПТВ и ТПО колебания происходят (в атмосфере и поверхностном слое океана) в общем синхронно. Ряды значений расхождения фактических с расчетными значениями аномалии ПТВ и ТПО тесно связаны корреляционно. Значения R для рядов с 1900 по 2016 гг. составляет 0,820, для рядов с 1850 по 2016 гг. – 0,839. Также из полученных результатов следует, что амплитуда колебания как для ПТВ, так и для ТПО в Северном полушарии выше, чем в Южном полушарии. На интервале с 1900 по 2016 гг. среднее по модулю значения аномалии ПТВ в Северном полушарии составляет $0,173^\circ\text{C}$ и $0,113^\circ\text{C}$ в Южном полушарии. Среднее значения аномалии ТПО (на этом же интервале) в Северном полушарии равно $0,147^\circ\text{C}$ и $0,107^\circ\text{C}$ в Южном полушарии.

Колебание с периодом около 60-ти лет выявляется вейвлет анализом данных аномалии ПТВ приведенных в архиве HadCRUT3 (рис. 1). При спектральном анализе архива HadCRUT3 выявляются два четких максимума спектральной плотности вблизи периодов 60 и 20 лет [18; 19].

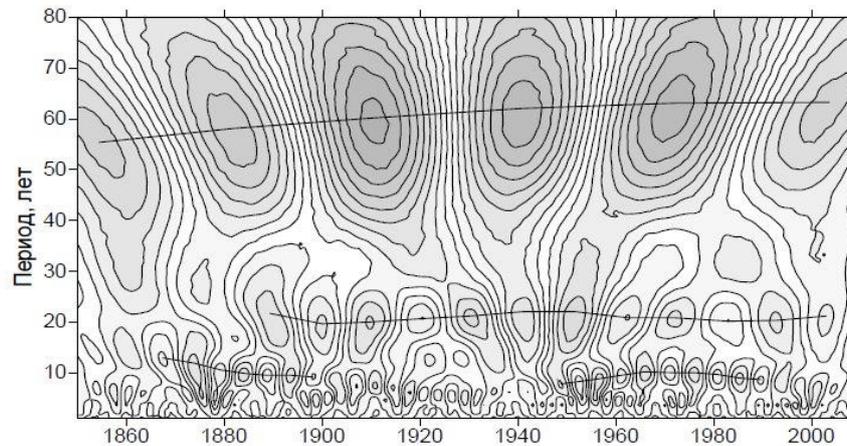


Рис. 1. Вейвлет-разложение ряда аномалии ПТВ [18]

В связи с тем, что данные по Североатлантической осцилляции представлены в архиве данных с 1856 г. [6], сравнение их с полученными нами расхождениями фактических и рассчитанных значений ТПО Северного полушария проводилось в интервале с 1856 по 2016 гг. (рис. 2).

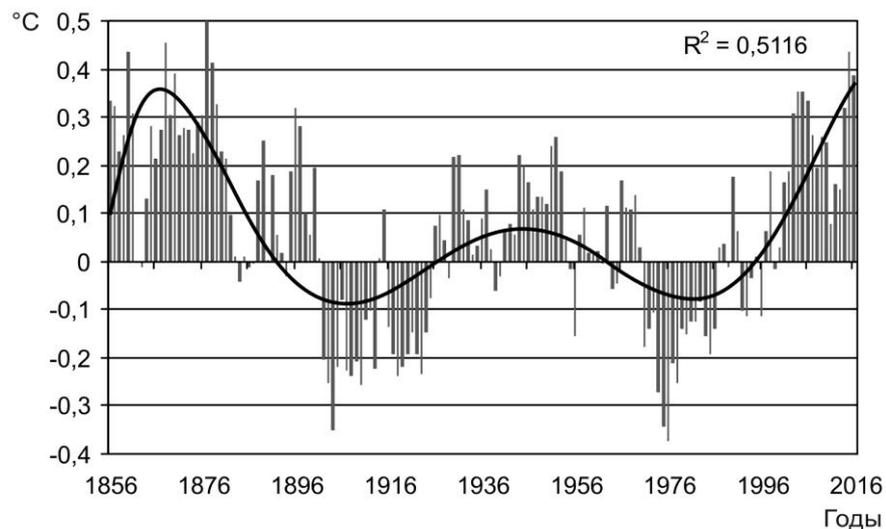


Рис.2. Распределение разности фактических и рассчитанных по ансамблю линейных и полиномиальных решений значений аномалии ТПО в Северном полушарии.

Выполнена оценка распределения разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО в «теплых» и «холодных» фазах колебания (табл. 1). В каждой фазе в среднем 79,9% фактических значений ТПО находятся либо выше

расчетных значений, либо ниже. Среднее по модулю значение аномалии ТПО на интервале с 1856 по 2016 гг. составляет 0,211°C. Среднее (по модулю) значение расхождения аномалии ТПО (с 1856 по 2016 гг.) составляет по всему массиву 0,159°C (75,4% от среднего модуля аномалии ТПО), для «теплых» и «холодных» эпох 0,150°C и -0,120°C соответственно.

Табл. 1. Характеристики «теплых» и «холодных» эпох ТПО Северного полушария в диапазоне с 1856 по 2016 гг.

Эпоха	Число лет		
	Всего	«Теплых»	«Холодных»
1856 – 1900 гг. «Теплая»	45	27 (81,8%)	6 (18,2%)
1901 – 1925 гг. «Холодная»	25	6 (13,9%)	37 (86,1%)
1926 – 1963 гг. «Теплая»	38	26 (68,4%)	12 (31,6%)
1964 – 1993 гг. «Холодная»	30	5 (16,7%)	25 (83,3%)
1994 – гг. «Теплая»			

Средняя продолжительность выделяемых эпох в этом случае (на интервале с 1856 по 2016 гг.) составляет 34,5 лет. Для завершённых эпох (исключается эпоха 1856 – 1900 гг., данные по которой могут быть ненадежными, и современная эпоха), средняя продолжительность составляет 31 год. Период колебания расхождения соответствующих фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО, таким образом, равен приблизительно 62 – 69 годам (в случае принятого варианта временной локализации «теплых» и «холодных» фаз колебания). С учетом продолжительности эпох (и выбранной временной локализации границ фаз) окончание текущей «теплой» эпохи можно ожидать в диапазоне 2025 – 2029 гг. Однако, как следует из рисунка 2 временные границы фаз колебания не являются четкими.

Полученное распределение разности фактических значений ТПО Северного полушария и рассчитанных сравнилось с распределением индекса АМО (рис. 3).

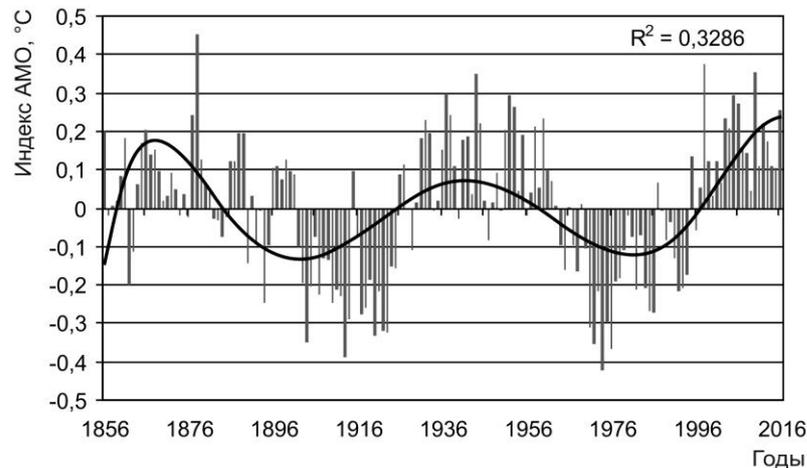


Рис. 3. Распределение среднегодового индекса АМО [6]

Сравнение полученного характера распределения разности фактических и расчетных значений аномалии ТПО Северного полушария с распределением индекса АМО показывает их значительное сходство. Следует отметить, что некоторые различия могут быть связаны с тем, что аномалии ТПО рассчитываются относительно периода 1961 – 1990 гг., а индекс АМО относительно периода 1951 – 1980 гг. Кроме того, аномалии ТПО определяются для всего Северного полушария, а индекс АМО только для Северной Атлантики.

Коэффициент корреляции разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и индекса АМО составляет по всему ряду 0,835, с 1900 по 2016 гг. – 0,842, с 1950 (наиболее достоверные метеоданные) – 0,877. Средние модули разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и индекса АМО имеют довольно близкие значения: 0,159°C и 0,146°C соответственно. Начало и продолжительность «теплых» и «холодных» фаз индекса АМО в точности совпадает или отличается всего на год от соответствующих эпох, выделяемых (в принятом варианте границ фаз колебания) в распределении разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО. Таким образом, разность фактических значений аномалии ТПО с рассчитанными по регрессионной модели с годовой ИК в качестве предиктора значениями ТПО и значения индекса АМО на интервале 1956 – 2016 гг., в общем, совпадают.

В макромире известно два фундаментальных физических взаимодействия: электромагнитное и гравитационное. Поскольку АМО составляет разность фактических и смоделированных на основе ИК, отражающей электромагнитное взаимодействие, значений аномалии ТПО, то АМО может иметь гравитационное происхождение, связанное с приливным взаимодействием Земли с Луной и планетами Солнечной системы [20].

3 Североатлантическая осцилляция и вариации скорости вращения Земли

Для исследования физической природы Североатлантической осцилляции многолетняя изменчивость аномалии ТПО и индекса АМО сравнивалась с вариациями скорости осевого вращения Земли (рис. 4). Изменение скорости вращения Земли характеризуется безразмерной величиной:

$$v = \frac{(\omega - \Omega)}{\Omega} = \frac{(T - P)}{P},$$

где T – длительность земных суток; P – длительность стандартных (атомных или эфемеридных) суток, равная 86400 с; $\omega = 2\pi/P_3$ и $\Omega = 2\pi/86400$ рад/с – угловые скорости, соответствующие земным и стандартным суткам. Поскольку величина ω изменяется только в девятом – восьмом знаке, то значения v имеют порядок 10^{-9} – 10^{-8} [21].

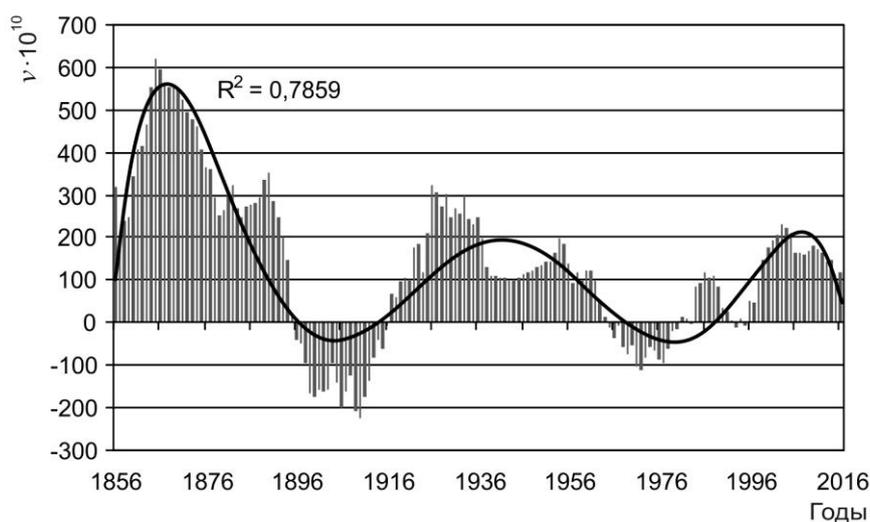


Рис. 4. Вариации скорости осевого вращения Земли, $v \cdot 10^{10}$
(по данным, предоставленным Н.С. Сидоренковым)

Значения коэффициента корреляции (R) между разностью фактических и расчетных значений аномалии ТПО и отклонением скорости осевого вращения по всему массиву данных (с 1856 по 2016 г.) составляют 0,506, с 1900 г. – 0,550, с 1950 г. – 0,684. Сходным образом изменяется значение R между индексом АМО и величиной отклонения скорости осевого вращения Земли. По массиву данных с 1856 г. по 2016 г. значение R составляет 0,438, с 1900 г. – 0,551, с 1950 г. – 0,763.

Таким образом, по мере увеличения достоверности данных (ближе к современности) связь становится более тесной. Повышение достоверности данных ТПО определяется увеличением числа станций и точности наблюдений. Повышение достоверности данных по отклонению скорости осевого вращения Земли связано с введением в практику наблюдений атомного времени (с 1955 г.). После сглаживания рядов по методу 5-летнего скользящего среднего значения R между вариациями скорости осевого вращения Земли и расхождением фактических и рассчитанных значений ТПО по всему массиву (с 1856 г.) становится равным 0,607, с 1900 г. 0,655, с 1950 г. 0,802. Значения R между значениями отклонения скорости осевого вращения Земли и индексом АМО по всему массиву (с 1856 г.) характеризуется значениями 0,546, с 1900 г. 0,697, с 1950 г. 0,900. Таким образом, эти явления тесно связаны между собой.

Сопоставление распределения аномалии ПТВ, ТПО рассчитанных на основе инсоляции, индекса АМО и отклонения скорости осевого вращения Земли за период с 1850 г. приведено на рис. 5 – 7. Значения разности фактических и рассчитанных значений аномалии ПТВ, ТПО и индекса АМО умножены на 1000.

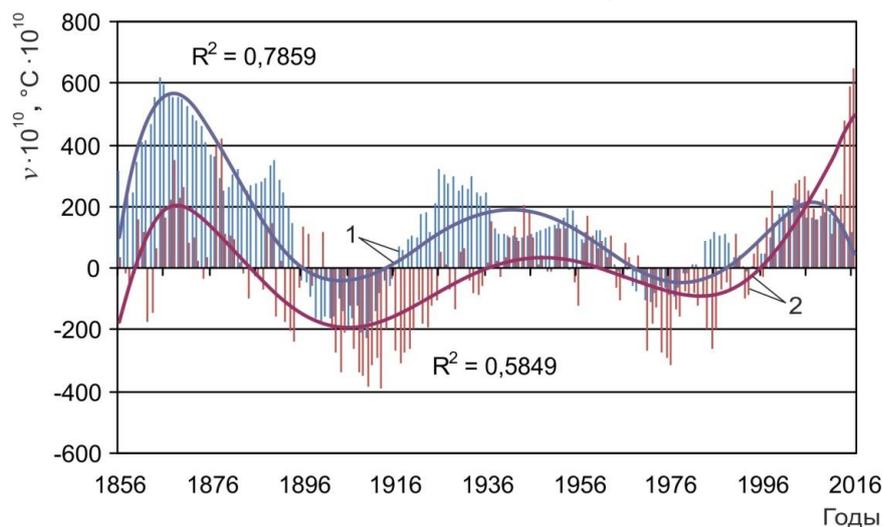


Рис. 5. Распределение вариаций скорости осевого вращения Земли (1), $v \cdot 10^{10}$ и разности между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО (2), $^{\circ}\text{C} \cdot 10^3$ (аппроксимация – полиномы 6-й степени).

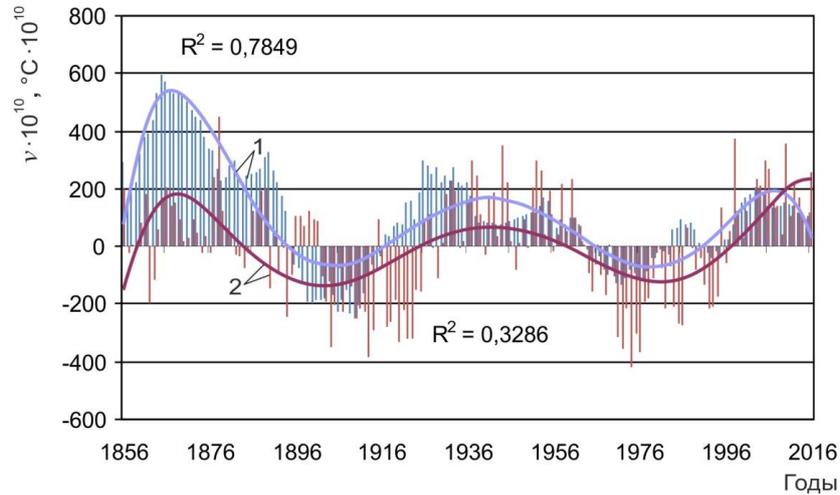


Рис. 6. Распределение вариаций скорости осевого вращения Земли (1), $v \cdot 10^{10}$ и индекса АМО (2), $^{\circ}\text{C} \cdot 10^3$ (аппроксимация - полиномы 6-й степени).

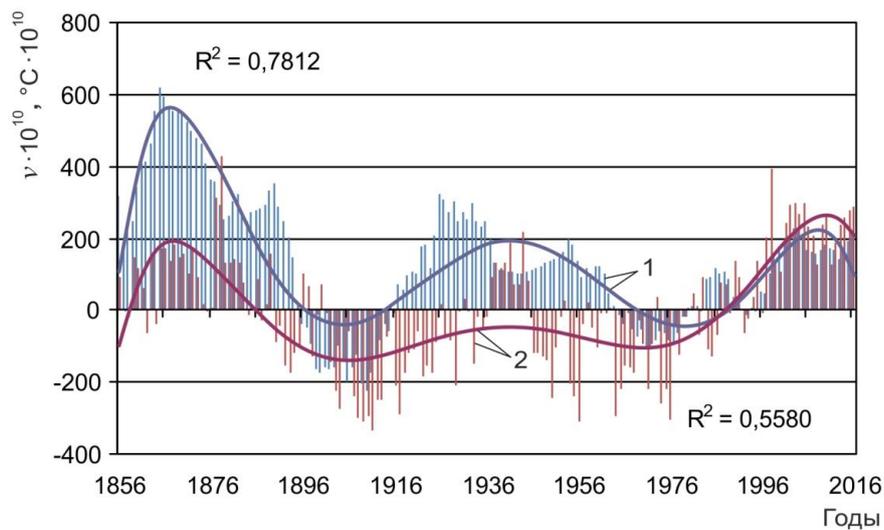


Рис. 7. Распределение вариаций скорости осевого вращения Земли (1), $v \cdot 10^{10}$ и разности между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ПТВ (2), $^{\circ}\text{C} \cdot 10^3$ (аппроксимация – полиномы 6-й степени).

Вариации скорости осевого вращения рассчитывались относительно среднего для 1961–90 гг. при сравнении с аномалией ПТВ и ТПО и относительно среднего за 1951–80 гг. при сравнении с индексом АМО (рис. 5–7).

Таким образом, Североатлантическая осцилляция (индекс АМО) приблизительно соответствует разности фактических и рассчитанных (по инсоляционной

контрастности в качестве предиктора) значений аномалии ТПО Северного полушария. Алгебраическое сложение значений индекса АМО с соответствующими рассчитанными по приходящей солнечной радиации значениями аномалии ТПО (рис. 8) приводит к существенному увеличению R и сокращению значений разности между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО. Коэффициент корреляции между этими рядами с 1956 г. становится равным 0,903, с 1900 г. 0,917. Величина среднего (по модулю) расхождения между фактическими и рассчитанными значениями ТПО с учетом индекса АМО оказывается равной $0,114^{\circ}\text{C}$ для рядов с 1956 по 2016 г ($0,094^{\circ}\text{C}$ для периода с 1900 по 2016 гг.). Это значительно меньше величины средней по модулю ($0,159^{\circ}\text{C}$) разности между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО за период с 1856 по 2016 гг.

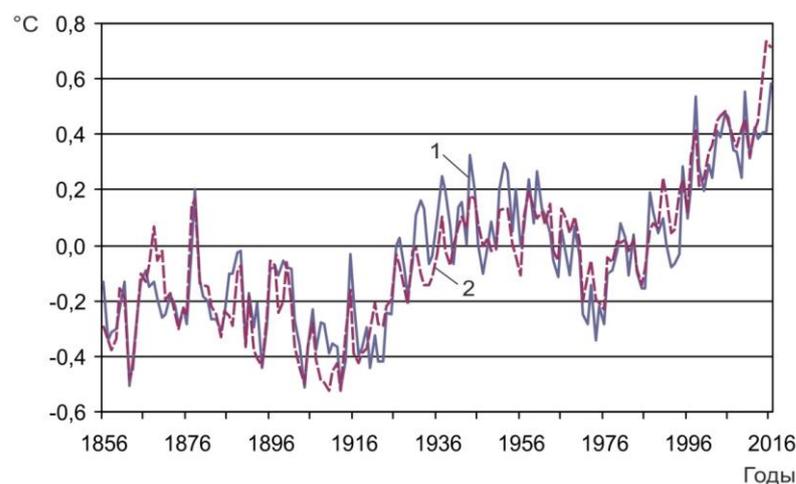


Рис. 8. Суммарные значения рассчитанной аномалии ТПО и соответствующих значений индекса АМО (1), фактические значения аномалии ТПО (2).

При этом отклонения скорости осевого вращения Земли тесно связаны и, в общем, синхронны с разностью фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО в Северном полушарии и с индексом АМО. Вариации скорости осевого вращения Земли могут быть следствием закона сохранения количества движения в системе океан – атмосфера при проявлении в этой системе геодинамического 60-ти летнего колебания.

Корреляция значений аномалии ПТВ с отклонением скорости осевого вращения Земли по всему массиву данных слабее, чем связь аномалии ТПО с отклонением скорости осевого вращения Земли. Коэффициент корреляции аномалии ПТВ с отклонениями скорости осевого вращения составляет по ряду с 1900 г. по 2016 г. – 0,434 (для ТПО и скорости вращения 0,551), по ряду с 1950 г. по 2016 г. – 0,535 (для ТПО и скорости вращения 0,763). Таким образом, корреляционная связь аномалии ТПО (и индекса АМО) с отклонением скорости осевого вращения

более тесная, чем связь аномалии ПТВ. Это указывает на то, что колебания ТПО, АМО и ПТВ генерируются океаном.

Обобщая полученные результаты можно отметить следующее.

1) В разности фактических значений аномалии ТПО и ПТВ с соответствующими рассчитанными по ансамблю линейных и полиномиальных решений регрессионной модели с годовой ИК в качестве предиктора обнаруживается мультидекадное колебание. Период колебания изменяется в диапазоне от 62 до 69 лет. В случае, если начало текущей «теплой» фазы колебания приходится на 1987 г., начало следующей «холодной» фазы ожидается в период с 2018 по 2022 гг. Если же начало текущей «теплой» фазы приходится на 1994 г., то смена фаз мультидекадного колебания может произойти в интервале от 2025 г. до 2029 г. Средняя амплитуда (на интервале 1900 – 2016 гг.) составляет $0,137^{\circ}\text{C}$ для аномалии ПТВ и $0,120^{\circ}\text{C}$ для аномалии ТПО.

2) Мультидекадная периодичность проявляется в обоих компонентах системы океан – атмосфера и имеет глобальное пространственное распространение. В Северном (менее океаническом) полушарии амплитуды этого колебания превышают амплитуды, полученные для Южного (более океанического) полушария. Для аномалии ПТВ это превышение (на интервале 1900 – 2016 гг.) составляет $0,06^{\circ}\text{C}$, для аномалии ТПО – $0,04^{\circ}\text{C}$. Отмечаемое нами колебание, вероятно, соответствует выделяемой в природной системе Земли В.И. Бышевым с коллегами ГАО – глобальной атмосферной осцилляции [22]. Границы фаз колебания нечеткие, поэтому и характеристики колебания определяются только приблизительно.

3) Мультидекадная осцилляция в Североатлантическом регионе соответствует известным колебаниям – АМО. Коэффициент корреляции разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и индекса АМО составляет по всему ряду $0,835$, с 1900 по 2016 гг. – $0,842$, с 1950 (наиболее достоверные метеоданные) – $0,877$. Средние модули разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и индекса АМО имеют довольно близкие значения: $0,159^{\circ}\text{C}$ и $0,146^{\circ}\text{C}$ соответственно. Начало и продолжительность «теплых» и «холодных» фаз индекса АМО в точности совпадает или отличается всего на год от соответствующих эпох, выделяемых (в принятом варианте) в распределении расхождения фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО. Таким образом, АМО – Североатлантическое региональное проявление ГАО.

4) АМО синхронизирована с изменением осевой скорости вращения Земли. При этом увеличения осевой скорости вращения Земли соответствуют периоды превышения фактических значений аномалии ТПО и ПТВ над рассчитанными значениями. При уменьшении скорости вращения фактические значения ТПО и ПТВ уступают рассчитанным значениям. Можно предположить, что движение теплых поверхностных водных масс из низких широт в высокие (по типу зонального прилива) сопровождается увеличением скорости осевого вращения Земли и наоборот, движение поверхностных океанических вод из низких широт в высокие сопровождается уменьшением скорости осевого вращения Земли.

5) Корреляционная связь аномалии ТПО и индекса АМО с отклонением скорости осевого вращения Земли более тесная, чем связь аномалии ПТВ. Это указывает на то, что генерирующая роль АМО (ГАО) связана с Мировым океаном, а

вариации скорости вращения Земли являются следствием закона сохранения количества движения в системе океан – атмосфера.

4 Астрономические причины мультидекадного колебания

Рассмотрим возможные причины АМО. Проявление колебаний со средним периодом около 60-ти лет известно во многих гидрометеорологических процессах. Это колебание отмечается в процессах теплообмена в системе океан – атмосфера [23]. Колебание с периодом близким к 60-ти годам проявляется в изменении поверхностной температуры воздуха [24; 25] и, по мнению некоторых исследователей, в динамике площади морских льдов в Северном полушарии [26; 27]. Как уже отмечалось, наиболее четко это колебание проявляется в Северной Атлантике. Предполагается космическая природа 60-ти летней периодичности [26; 27]. Однако единства мнений относительно генезиса этого явления, пока не существует [28].

При моделировании ПТВ и ТПО на основе регрессионной модели АМО объясняется 15,8% дисперсии аномалии ПТВ Земли, 21,0% дисперсии аномалии ПТВ в Северном полушарии и 9,4% – в Южном полушарии. В Южном полушарии АМО объясняется 15,9% дисперсии аномалии ТПО мирового океана, 21,8% дисперсии аномалии ТПО в Северном полушарии и 8,4% – в Южном полушарии. В связи с этим возникает необходимость рассмотреть возможные причины этой осцилляции.

Из полученных результатов следует, что в основе АМО должно быть, существующее в природе (в окружающем Землю космическом пространстве) обусловленное гравитационным взаимодействием колебание с периодом около 60-ти лет (исходный гравитационный сигнал). Известно, что планеты-гиганты Юпитер и Сатурн при движении вокруг Солнца образуют последовательные соединения (находятся на одной геоцентрической долготе) приблизительно каждые 20 лет [20; 29; 30]. Их приливное и возмущающее действие на Землю в эти периоды усиливается (в квадратуры ослабляется) по аналогии с сизигийными и квадратурными лунно-солнечными приливами. Соединения планет происходят в различных точках эклиптики. Однако, приблизительно каждые 60 лет соединение Юпитера и Сатурна происходит в довольно узком секторе эклиптики. То есть периодически (с периодом около 60 лет) происходит приблизительно повторение конфигурации Юпитера и Сатурна относительно Земли и Солнца. С этой периодичностью может быть связана генерация 60-ти летней периодичности в окружающем Землю пространстве (гравитационного сигнала).

Здесь уместно напомнить о таких физических явлениях как синхронизация, соизмеримость и резонанс. Синхронизация определяется, как «свойство материальных объектов самой различной природы вырабатывать единый ритм совместного существования, несмотря на различие индивидуальных ритмов и на подчас крайне слабые взаимные связи» [31]. Явление синхронизации состоит в том, что несколько, например, природных объектов, совершающих при отсутствии

взаимодействия колебательные или вращательные движения с различными частотами (угловыми скоростями), при наложении даже весьма слабых связей начинают двигаться с одинаковыми, кратными или находящимися в рациональных отношениях частотами (угловыми скоростями). Причем, устанавливаются определенные фазовые соотношения между колебаниями и вращениями.

Явление синхронизации – это механический процесс, возникающий, например, при движении небесных тел в Солнечной системе и приводящий к появлению соизмеримости в средних движениях планет и резонансам [32]. В связи с этим, представляется возможной синхронизация приливных явлений в Мировом океане с генерируемым Юпитером и Сатурном 60-ти летним колебанием (приливным неравенством). Синхронизация может определяться наличием слабых гравитационных связей Земли с Юпитером и Сатурном и регулярными (с периодом около 60 лет) и бесконечно долгими повторениями их однотипных конфигураций относительно Земли и Солнца. Таким образом, генезис АМО может быть связан с явлением синхронизации. Также это колебание может усиливаться вследствие резонанса из-за соизмеримости в движениях небесных тел.

Из астрономии известно, что в параметрах движений планет (и их спутников) выдерживается ряд интересных соотношений вследствие наличия соизмеримостей и резонансов [32]. Периоды обращения планет-гигантов Юпитера и Сатурна равны приблизительно 12-ти и 30-ти годам соответственно, и, следовательно, отношение этих периодов близко к резонансу 2/5. То есть, 2 оборота Сатурна вокруг Солнца происходят приблизительно за то же время, что и 5 оборотов Юпитера. Приблизительно через 60 лет взаимные положения Юпитера и Сатурна повторяются (соединения происходят в довольно узком секторе эклиптики). В таких случаях говорят, что между периодами обращения планет имеет место соизмеримость (орбитальный резонанс). Благодаря соизмеримости возникает нечто подобное явлению, которое в механике называется резонансом. Резонанс возникает тогда, когда на колеблющееся тело в такт его колебаниям действует дополнительная периодическая сила. Такая дополнительная сила, даже в том случае, если ее величина очень мала, приводит постепенно к большому увеличению размаха колебаний [29; 32; 33].

Кроме этого, период парных соединений планет-гигантов Юпитера и Сатурна равен 19,86 лет. Период обращения лунных узлов (точек пересечения лунной орбиты с эклиптикой) – 18,61 года (нутаационный цикл – проявляется и в инсоляции Земли из-за изменения угла наклона оси вращения под гравитационным влиянием Луны). Учитывая, что $\omega = 2\pi/T$ и $T_1 = 18,61$ года = 6797,157 суток, $T_2 = 19,86$ года = 7253,71 суток, получаем $\omega_1 = 0,000924$ сут⁻¹, $\omega_2 = 0,000866$ сут⁻¹ и $\omega_1 - \omega_2 = 0,000058$ сут⁻¹. То есть в движениях парного соединения Юпитера и Сатурна и обращения лунных узлов имеется соизмеримость (аналог резонанса в механике – орбитальный резонанс с резонансным числом 1/1). Соизмеримость в движениях Юпитера и Сатурна отмечается и с 19-ти летним циклом Метона [17]. Колебания с периодом около 19-ти лет (связанные нутацией и/или с 19-ти летним циклом Метона) проявляются в Мировом океане [34; 35; 36] и в атмосфере [37]. Из этого следует вероятность проявления в Мировом океане и зонального коле-

бания с периодичностью около 60-ти лет. Одна («теплая») фаза колебания, возможно, отражает движение водных масс от экватора в сторону полюсов. Другая («холодная») фаза определяется движением водных масс в обратном направлении.

Еще одним эффектом, которым может усиливаться 60-ти летнее колебание может быть стохастический резонанс. Эффект стохастического резонанса проявляется в отклике бистабильной или метастабильной нелинейной системы на слабый периодический сигнал при шумовом воздействии определенной мощности [38; 39; 40]. Океанические приливы характеризуются значительным «шумом», в связи с этим 60-ти летнее колебание, генерируемое Юпитером и Сатурном, может быть слабым периодическим сигналом, находящим отклик в приливной динамике Мирового океана.

Таким образом, АМО может быть результатом синхронизации и резонансного усиления 60-ти летней периодичности (слабо, но бесконечно долго действующей на Землю) генерируемой в окружающем Землю пространстве движением Юпитера и Сатурна вокруг Солнца. Вероятно, что АМО – это колебание, которое возникает в океане из-за синхронизации с повторением конфигураций Юпитера и Сатурна относительно Солнца и Земли. Оно усиливается резонансом из-за соизмеримости с нутационным циклом (периодом обращения лунных узлов) и стохастическим резонансом. Это океаническое колебание воспринимается нижней атмосферой. Оно также проявляется в изменении скорости осевого вращения Земли вследствие закона сохранения количества движения в системе океан – атмосфера.

5 Заключение

В заключение проведем сопоставление дат смены фаз АМО с датами астрономических конфигураций Юпитера и Сатурна в интервале с 1900 по 2050 гг. Если за начало осцилляции принять даты смены «теплой» фазы АМО на «холодную» фазу, то окажется, что эти даты синхронны соединениям Юпитера и Сатурна в секторе, ограниченном геоцентрическими долготами от 283° до 301° . Отсчет геоцентрических долгот ведется от точки весеннего равноденствия по ходу видимого движения Солнца. Согласно астрономическим эфемеридам эти соединения приходятся на 1901, 1961, 2020 годы. Даты перехода от «холодной» фазы АМО к «теплой» синхронизируются с квадратурой Юпитера и Сатурна (разность геоцентрических долгот равна 90°). Эти квадратуры Юпитера и Сатурна отмечаются в 1926 и в 1986 годах. Очередное соединение по данным астрономических эфемерид [41], произойдет в 2020 году (смена «теплой» фазы АМО на «холодную») и с 2021 года ожидается начало «холодной» фазы АМО. В 2045 году будет образована квадратура Юпитера и Сатурна и с 1946 года, вероятно, начнется очередная «теплая» фаза. Однако в системе океан – атмосфера эти даты могут испытывать

колебания относительно дат астрономических конфигураций в связи с нелинейностью, происходящих в океане и атмосфере процессов и изменением термического состояния системы океан – атмосфера (как и природной системы Земли). При проведенном нами сопоставлении «теплая» и «холодная» фазы АМО имеют различную продолжительность. Продолжительность «холодных» фаз КМО составляет 25 – 26 лет, продолжительность «теплых» фаз составляет 34 – 35 лет. АМО в «теплые» фазы усиливает и в «холодные» фазы ослабляет общую тенденцию потепления современного глобального климата.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1).

Литература

1. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*, 1994. V. 367. № 6465. P. 723–726. DOI:10.1038/367723a0.
2. Delworth, T. L., Mann, M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere // *Climate Dynamics*, 2000. V. 16. P. 661–676. DOI:10.1007/s003820000075
3. Sutton R. T., Hodson L. R. Atlantic Ocean Forcing of North American and European Summer Climate // *Science*, 2005. V. 309. № 5731. P. 115–18. DOI:10.1126/science.1109496.
4. Knight J. R., Folland C. K., Scaife A. A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophys. Res. Lett.*, 2006. V.33. № L17706. DOI:10.1029/2006GL026242.
5. Chylek P., Lesins. G. Multidecadal variability of Atlanhurricane activity: 1851–2007 // *Journal of Geophysical Research*, 2008. V. 113. № D22106. doi:10.1029/2008JD010036
6. National Oceanic and Atmospheric Administration (Электронный ресурс Национального управления океанических и атмосферных исследований США). URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>.
7. Enfield D. B., Mestas-Nunez A. M., Trimble P. J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Res. Lett.*, 2001. V. 28. P. 2077 – 2080. DOI:10.1029/2000GL012745.
8. Goldenberg, S. B., Landsea C.W., Mestas-Nunez A.M., Gray W.M. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications // *Science*, 2001. V. 293. № 5529. P. 474–479. DOI:10.1126/science.1060040.
9. Shanahan T. M., Overpeck J.T., Anchukaitis K.J., Beck J.W., Cole J.E., Dettman D.L., Peck J.A., Scholz C.A., King J.M. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa // *Science*, 2009. V. 324. № 5925. P. 377–380. DOI:10.1126/science.1166352.
10. Teegavarapu R. S. V., Goly A., Obeysekera J. Influences of Atlantic Multi-Decadal Oscillation on Regional Precipitation Extremes // *Journal of Hydrology*, 2013. V. 495. P. 74–93.
11. Федоров В.М., Сократов С.А., Фролов Д.М. Тенденции изменения приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации и их пространственная локализация // *Исследование Земли из космоса*, 2019. № 5. С. 50–58. DOI: 10.31857/S0205-96142019550-58.

12. Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // *Космические исследования*, 2019. Т. 57. № 3. С. 177–184. DOI:10.1134/S002342061903004X
13. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. V. 60. № 7. P. 993–998. DOI:10.1134/S0016793220070117.
14. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 / *Springer Geology*, 2020. V. I. P. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6_20.
15. Федоров В.М. Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // *Геофизические процессы и биосфера*, 2019. Т. 18. № 3. С. 117–128. DOI:10.21455/GPB2019.3-8.
16. Fedorov V.M. Insolation Contrast and Trends in Modern Climate Change // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022. V. 62. № 7. P. 932–937. DOI: 10.1134/S001679322207009X
17. Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматлит, 2018. 232 с.
18. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // *Исследование Земли из Космоса*, 2015. № 1. С. 3–11.
19. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: РГГМУ, 2012. 260 с.
20. Федоров В.М. Астрономическая климатология. М.: Московский университет, 2002. 236 с.
21. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 384 с.
22. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Эль-Ниньо как следствие глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // *ДАН*, 2012. Т. 446. № 1. С. 1–6.
23. Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н. Междекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // *ДАН*, 2012. Т. 443. № 3. С. 372–376.
24. Scafetta N. Climate Change and Its cause: A Discussion about Some Key Issues / *SPPI Original Paper*, 2010. P. 3–28.
25. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. М.: ИГКЭ, 2012. 194 с.
26. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // *МГИ*, 2008. № 105. С. 158–165.
27. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики: результат действия естественных причин // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2010. № 2 (85). С. 52–61.
28. Малинин В.Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // *Ученые записки РГГМУ*, 2015. № 41. С. 100–115.
29. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1972. 360 с.
30. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1983. 560 с.
31. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
32. Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
33. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 800 с.

34. Дарвин Дж. Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. М.: Наука, 1965. 252 с.
35. Максимов И.В., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Океан и космос. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 216 с.
36. Foreman M.G.G., Neufeld E.T. Analyses harmoniques de la mare portant sur de longues series chronologiques // *Revue hydrographique internationale*. Monaco, LXIII (1), 1991. P. 89–113.
37. Максимов И.В., Абрамов Р.В. К изучению нутационной миграции исландского минимума атмосферного давления // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 1966. Вып. 23. С. 14–20
38. Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский – Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения порядка // *Успехи физических наук*, 1999. Т. 169. № 1. С. 7–38.
39. Анищенко В.С., Ануфриева М.В., Вадивасова Т.Е. Стохастический резонанс в бистабильной системе под воздействием хаотического сигнала // *Письма в ЖТФ*, 2006. Т. 32(20). С. 12 – 17.
40. Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G. Sorce contributions to new understanding of global change and solar variability // *Solar Physics*, 2005. 230. P. 27–53.
41. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США. URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov>.

References

1. Schlesinger M.E Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years *Nature* 1994. V. 367. 6465. P. 723–726. DOI10.1038367723a0.
2. Delworth T. L. Mann M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere *Climate Dynamics* 2000. V. 16. P. 661–676. DOI10.1007s003820000075
3. Sutton R. T. Hodson L. R. Atlantic Ocean Forcing of North American and European Summer Climate *Science* 2005. V. 309. 5731. P. 115–18. DOI10.1126science.1109496.
4. Knight J. R. Folland C. K Scaife A. A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation *Geophys. Res. Lett.* 2006. V.33. L17706. DOI10.10292006GL026242.
5. Chylek P. Lesins. G. Multidecadal variability of Atlanhurricane activity 1851–2007 *Journal of Geophysical Research* 2008. V. 113. D22106. doi10.10292008JD010036
6. National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>.
7. Enfield D. B. Mestas-Nunez A. M. Trimble P. J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2077 – 2080. DOI10.10292000GL012745.
8. Goldenberg S. B. Landsea C.W. Mestas-Nunez A.M. Gray W.M. The recent increase in Atlantic hurricane activity Causes and implications *Science* 2001. V. 293. 5529. P. 474–479. DOI10.1126science.1060040.
9. Shanahan T. M. Overpeck J.T. Anchukaitis K.J. Beck J.W. Cole J.E. Dettman D.L. Peck J.A. Scholz C.A. King J.M. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa *Science* 2009. V. 324. 5925. P. 377–380. DOI10.1126science.1166352.

10. Teegavarapu R. S. V. Goly A. Obeysekera J. Influences of Atlantic Multi-Decadal Oscillation on Regional Precipitation Extremes *Journal of Hydrology* 2013. V. 495. P. 74–93.
11. Fedorov V.M. Sokratov S.A. Frolov D.M. Tendencii izmeneniya prirodyashhej na verxnyuyu granicu atmosfery solnečnoj radiacii i ix prostranstvennaya lokalizaciya *Issledovanie Zemli iz kosmosa* 2019. 5. S. 50–58. DOI 10.31857/S0205-96142019550-58.
12. Fedorov V.M. Frolov D.M. Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost prirodyashhej na verxnyuyu granicu atmosfery solnečnoj radiacii *Kosmicheskie issledovaniya* 2019. T. 57. 3. S. 177–184. DOI10.1134/S002342061903004X
13. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch *Geomagnetism and Aeronomy* 2020. V. 60. 7. P. 993–998. DOI10.1134/S0016793220070117.
14. Fedorov V.M. Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 *Springer Geology* 2020. V. I. P. 181–192. DOI10.1007978-3-030-38177-6_20.
15. Fedorov V.M. Problema meridionalnogo perenosa tepla v astronomicheskoj teorii klimata *Geofizicheskie processy i biosfera* 2019. T. 18. 3. S. 117–128. DOI10.21455/GPB2019.3-8.
16. Fedorov V.M. Insolation Contrast and Trends in Modern Climate Change *Geo-magnetism and Aeronomy* 2022. V. 62. 7. P. 932–937. DOI 10.1134/S001679322207009X
17. Fedorov V.M. Solnechnaya radiaciya i klimat Zemli. M. Fizmatlit 2018. 232 s.
18. Malinin V.N. Gordeeva S.M. Izmenchivost vlagosoderzhaniya atmosfery nad okeanom po sputnikovym dannym *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2015. 1. S. 3–11.
19. Malinin V.N. Uroven okeana nastoyashhej i budushhej. SPb. RGGMU 2012. 260 s.
20. Fedorov V.M. *Astronomicheskaya klimatologiya*. M. Moskovskij universitet 2002. 236 s.
21. Sidorenkov N.S. *Fizika nestabilnostej vrashheniya Zemli*. M. Fizmatlit 2002. 384 s.
22. Byshev V.I. Nejman V.G. Romanov Yu.A. Seryx I.V. E"l-Nino kak sledstvie glo-balnoj atmosfernoj oscillyacii v dinamike klimaticheskij sistemy Zemli *DAN* 2012. T. 446. 1. S. 1–6.
23. Anisimov M.V. Byshev V.I. Zalesnyj V.B. Moshonkin S.N. Mezhdokadnaya izmenchi-vost termicheskoj struktury vod Severnoj Atlantiki i ee klimaticheskaya znachi-most *DAN* 2012. T. 443. 3. S. 372–376.
24. Scafetta N. Climate Change and Its cause A Discussion about Some Key Issues *SPPI Original Paper* 2010. P. 3–28.
25. Gruza G.V. Rankova E".Ya. Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii temperatura vozduxa. M. IGKE" 2012. 194 s.
26. Frolov I.E. Gudkovich Z.M. Karklin V.P. Smolyanickij V.M. Shestidesyatiletnyaya ciklichnost v izmeneniyax klimata polyarnyx regionov *MGI* 2008. 105. S. 158–165.
27. Frolov I.E. Gudkovich Z.M. Karklin V.P., Smolyanickij V.M. Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki rezultat dejstviya estestvennyx prichin *Problemy Arkti-ki i Antarktiki* 2010. 2 (85). S. 52–61.
28. Malinin V.N. Izmeneniya urovnya Mirovogo okeana i klimata *Uchenye zapiski RGGMU* 2015. 41. S. 100–115.
29. Beleckij V.V. *Oчерки o dvizhenii kosmicheskix tel*. M. Nauka 1972. 360 s.
30. Bakulin P.I. Kononovich E".V. Moroz V.I. *Kurs obshhej astronomii*. M. Nauka 1983. 560 s.
31. Blexman I.I. *Sinxronizaciya dinamicheskix sistem*. M. Nauka 1971. 896 s.
32. Grebenikov E.A. Ryabov Yu.A. *Rezonansy i malye znamenateli v nebesnoj mexanike*. M. Nauka 1978. 128 s.
33. Duboshin G.N. *Nebesnaya mexanika. Osnovnye zadachi i metody*. M. Nauka 1975. 800 s.
34. Darwin Dzh. G. *Prilivy i rodstvennye im yavleniya v Solnečnoj sisteme*. M. Nauka 1965. 252 s.

35. Maksimov I.V. Saruxanyan E".I. Smirnov N.P. Okean i kosmos. L. Gidrometeoizdat 1970. 216 s.
36. Foreman M.G.G. Neufeld E.T. Analyses harmoniques de la mare portant sur de longues series chronologiques Revue hydrographique internationale. Monaco LXIII (1) 1991. P. 89–113.
37. Maksimov I.V. Abramov R.V. К изучению нутационной миграции островского мини-мума атмосферного давления Problemy Arktiki i Antarktiki 1966. Vyp. 23. S. 14–20
38. Anishhenko V.S. Nejman A.B. Moss F. Shimanskij – Gajer L. Stokhasticheskiy rezonans kak inducirovannyj shumom effekt uvelicheniya poryadka Uspexi fizicheskix nauk 1999. T. 169. 1. S. 7–38.
39. Anishhenko V.S. Anufrieva M.V. Vadivasova T.E. Stokhasticheskiy rezonans v bista-bilnoj sisteme pod vozdejstviem xaoicheskogo signala Pisma v ZhTF 2006. T. 32(20). S. 12 – 17.
40. Lean J. Rottman G. Harder J. Kopp G. Sorce contributions to new understanding of global change and solar variability Solar Physics 2005. 230. P. 27–53.
41. NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov>.

On the Physical Cause of North-Atlantic Multidecadal Oscillation

Valery Fedorov^{1,2}, Alim Zalikhanov^{1,3}, Ekaterina Fedorova^{1,4}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ²fedorov.msu@mail.ru, ³bulungu@yandex.ru,

⁴fedorov.msu@mail.ru

Abstract. It is shown, that the North Atlantic oscillation corresponds to the difference between the values of the near-surface air temperature calculated on the basis of the regression model with insolation contrast as a predictor and the actual long-term changes in the near-surface air temperature. This proves the gravitational nature of the North Atlantic Oscillation. It is also shown, that the periodicity of the North Atlantic Oscillation can be the result of synchronization and resonant amplification of the 60-year periodicity generated in the space surrounding the Earth by the comparability in the average motions of the giant planets: Jupiter and Saturn.

Keywords: North Atlantic oscillation, insolation contrast, regression model, commensurability, orbital resonance, tidal inequalities.

Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформы

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: konstantintchekarev@yandex.ru,

³E-mail: bulungu@yandex.ru

Аннотация. Установки большой мощности, преобразующие кинетическую энергию ветра в электроэнергию, из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры, что приводит к необходимости сооружать большие конструкции при использовании в установках ветроколеса с горизонтальной осью вращения. Предложен вариант парусной энергетической установки наземного базирования, в которой проблема, связанная с большими размерами преобразователей энергии ветра, снимается. Была разработана и создана экспериментальная установка для проведения исследований на макетах парусной энергетической установки наземного базирования, включающей платформы с установленными на них парусами. Проведенные экспериментальные исследования показали работоспособность входящих в экспериментальную установку систем, найдены элементы конструкции, которые могут быть использованы при реализации парусной установки наземного базирования. Разработан метод прямого измерения сил, действующих на платформу, что позволяет определить коэффициент эффективности использования кинетической энергии воздушного потока. Результаты исследований представлены в данной статье.

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

1 Введение

Использование кинетической энергии ветра в хозяйственной деятельности человека насчитывает много веков. Преобразователи энергии ветра в виде ветроколеса использовались только на суше для совершения работы, а преобразователи ветровой энергии в виде паруса использовались в основном на воде для перемещения транспортных средств. Известны примеры использования парусов для перемещения транспортных средств на суше [1], но это направление развития не получило. С появлением зеленой энергетики, установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали использоваться для производства электроэнергии, и устанавливаются как на суше, так и на море. В настоящее время ветроэнергетика является одной из самых быстроразвивающихся отраслей возобновляемой энергетики. По оценкам The Global Wind Council за 2021 год [2], в 2020 году было введено рекордное количество мощностей в глобальной ветроэнергетике. В большинстве действующих ветровых установках преобразование энергии ветрового потока в электроэнергию осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на мачте. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующее основание, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки, что приводит к усложнению конструкций и увеличению их стоимости. Предлагаются различные варианты решения проблемы, связанной с большими размерами преобразователей энергии ветрового потока.

2 Актуальность исследований и постановка цели

Известен 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 [3]. В этой конструкции энергетической установки проблема создания прочной опоры при больших размерах преобразователей энергии снимается, но при этом возникает другая проблема. Установка может работать только при большом диаметре кольцевого понтона, в противном случае система наветренных лопастей будет перекрывать систему лопастей, находящихся за ними, однако при большом диаметре кольцевого понтона практически невозможно создать конструкцию, способную выдерживать волновое воздействие.

Ранее нами были разработаны варианты парусной энергетической установки, позволяющие снять проблему больших размеров преобразователя энергии ветрового потока и проблему устойчивости волновому воздействию [4, 5, 6]. Другая конструкция энергетической установки (5) содержит парусный катамаран, к корпусам которого снизу прикреплен гидрогенератор, выполненный в виде крыльчатки и электрогенератора. Катамаран движется циклично по дуговой траектории в заданном угловом интервале, что позволяет увеличить эффективность преобразования энергии ветрового потока. Для движения по такой траектории катамаран выполнен в виде конструкции, симметричной относительно носа и кормы, электрическим кабелем соединен с бумом, закрепленным на морском дне, и имеет систему изменения положения парусов и систему управления движением катамарана. Движение по дуговой траектории было автоматизировано [7]. Этот вариант парусной энергетической установки [6] позволяет повысить эффективность использования энергии ветрового потока за счет задания области перемещения катамарана, в которой он все время движется курсом галфвинд. Однако в предлагаемых вариантах энергетических установок их эффективность также оказывается низкой, поскольку часть энергии ветрового потока расходуется на преодоление сопротивления водной массы движению 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.

Известен более ранний вариант конструкции парусной энергетической установки наземного базирования [8], который является сухопутным аналогом ветроэнергетической морской установки [3]. Установка содержит платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по прямолинейному рельсовому пути. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электроэнергия вырабатывается с помощью электрогенераторов, установленных на платформах. Как и ветроэнергетическая морская установка [3], 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 парусной энергетической установки наземного базирования можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ так, как это сделано в парусной энергетической установке морского базирования [5]. Это означает, что платформы должны двигаться циклично в заданном интервале перемещений и иметь систему изменения положения парусов и систему управления движением платформ для того, чтобы платформы начинали двигаться в противоположную сторону в точках, ограничивающих интервал перемещений платформ. Была создана экспериментальная установка, элементы которой обрабатывались в процессе проведения исследований, при этом учитывался опыт и использовались элементы экспериментальной установки, на которой проводились исследования парусной энергетической установки морского базирования [5]. Экспериментальные исследования, результаты которых изложены в статье [9] показали работоспособность входящих в неё элементов. Были проведены исследования по методике вычисления сил, действующих на платформы, путем определения скорости платформы при её движении с грузами разного веса [10]. Для проведения экспериментов по данной методике разработан метод точного измерения величины коэффициента трения [11]. Разработанный метод осуществлялся следующим образом: к одной из сторон платформы крепилась перекинутая через блок нить с подвешенным на другом конце грузом. Величина груза подбиралась таким образом, чтобы платформа начинала медленно двигаться с постоянной скоростью. В процессе проведения предварительных экспериментов по этой методике, выяснилось, что поверхность, по которой движется платформа, должна обладать рядом свойств: она должна быть ровной и строго горизонтальной. Эти условия могут быть выполнены, если платформа будет двигаться по эстакаде. Эксперименты с движением платформ по эстакаде были предусмотрены программой исследований, поскольку предполагалось, что парусные энергетические системы могут быть использованы в тех районах, в которых платформы не могут двигаться по земле, например, в районах вечной мерзлоты.

В данном исследовании предложенная нами методика точного измерения коэффициента трения используется для прямого измерения сил, действующих на парусную платформу, что позволяет найти коэффициент эффективности преобразования энергии ветрового потока.

3 Экспериментальная установка, методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка включала генератор ветрового потока, платформы, на которых была установлена паруса, систему изменения положения парусов, направляющую систему, и систему управления движением платформ. Для проведения экспериментов с точным измерением величины коэффициента трения была разработана конструкция двух типов эстакад, изображения которых представлено на Рис 1. Платформы двигались по поверхности двух электрических коробов размером 25x16 мм, расположенных на расстоянии 145 мм друг от друга, и отстоящих от горизонтальной плоскости на расстоянии 160 мм. В середине эстакады находился направляющий рельс, выполненный из пластикового короба сечением 12 x 12 мм, на котором была нанесена разметка с интервалом 10 см. Направляющие рельсы эстакад отстояли от генератора ветрового потока на расстояниях 50 см и 65 см. Генератор ветрового потока, изображение которого также представлено на Рис.1, был выполнен в виде системы вытяжных вентиляторов в количестве 13 штук, расположенных рядом друг с другом на рейке, длиной 2 метра. На Рис.2 представлен график распределения скоростей в вертикальных плоскостях, отстоящих от генератора ветрового потока на расстояниях 35 см, 50 см и 65 см. Как показали результаты исследований, изложенные в статье (9), несмотря на разницу распределения скоростей в этих плоскостях, эффективность воздействия ветрового потока на скорость платформ оказалась практически одинаковой. Это объясняется особенностью ветрового потока от применяемого ветрового генератора – наиболее высокие скорости в горизонтальной плоскости, проходящей по центру генераторной установки (Рис. 2). Высота парусов, установленных на платформах, позволяет перекрывать области с наибольшими скоростями ветра.



Рис. 1. Генератор ветрового потока.

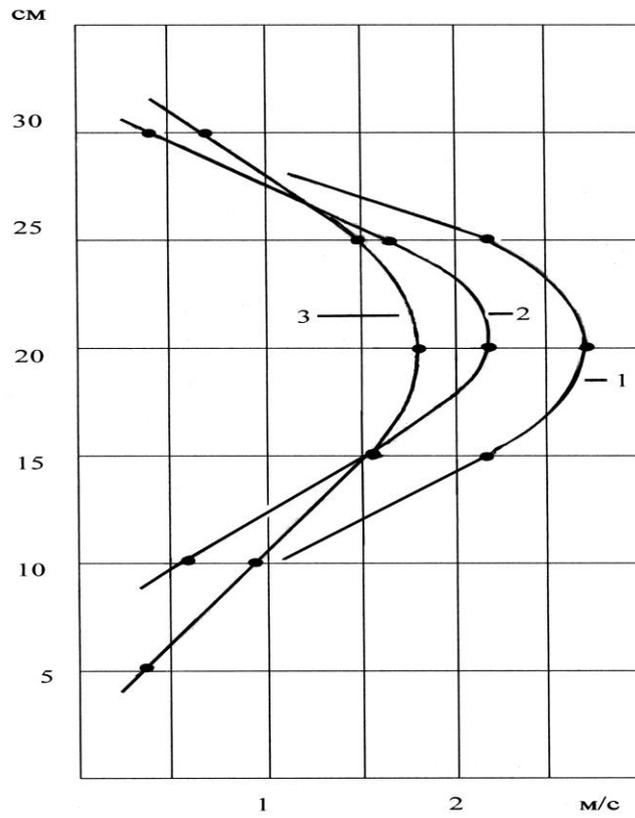


Рис. 2. График распределения скоростей в вертикальных плоскостях, отстоящих от генератора ветрового потока на расстояниях: 1) 35 см, 2) 50 см, 3) 65 см.

Экспериментальные исследования, представленные в данной статье, проводились на тех же платформах, что и эксперименты, результаты которых приведены в статье [9]. Изображение платформы представлено на Рис.3. Рамка платформы, к которой крепились 4 пластмассовых колеса диаметром 40 мм, имела размер 22см 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. Мачты были расположены на расстоянии 11 см друг от друга. Они поворачивались вокруг своей оси с помощью системы изменения положения парусов, включавшей электромотор с редуктором, на вал которого была надета небольшая шестеренка, а на одной из мачт была закреплена шестеренка большего диаметра. В зависимости от поставленной задачи мачты могли поворачиваться в угловом диапазоне 70о-100о. К мачтам были прикреплены паруса площадью 256 см² каждый. Чтобы снизить ветровую нагрузку на систему изменения положения парусов, они были симметричной формы относительно мачты, как это видно на Рис. 3. Размеры парусов составляли по высоте 24 см, по ширине внизу 16 см и вверху 11 см. Паруса были сделаны из металлизированной пленки, которая крепилась к мачте и нижней рее, и были усилены 3 ребрами. Для обеспечения одновременного изменения положения парусов нижние рейы были соединены легкой перемычкой.

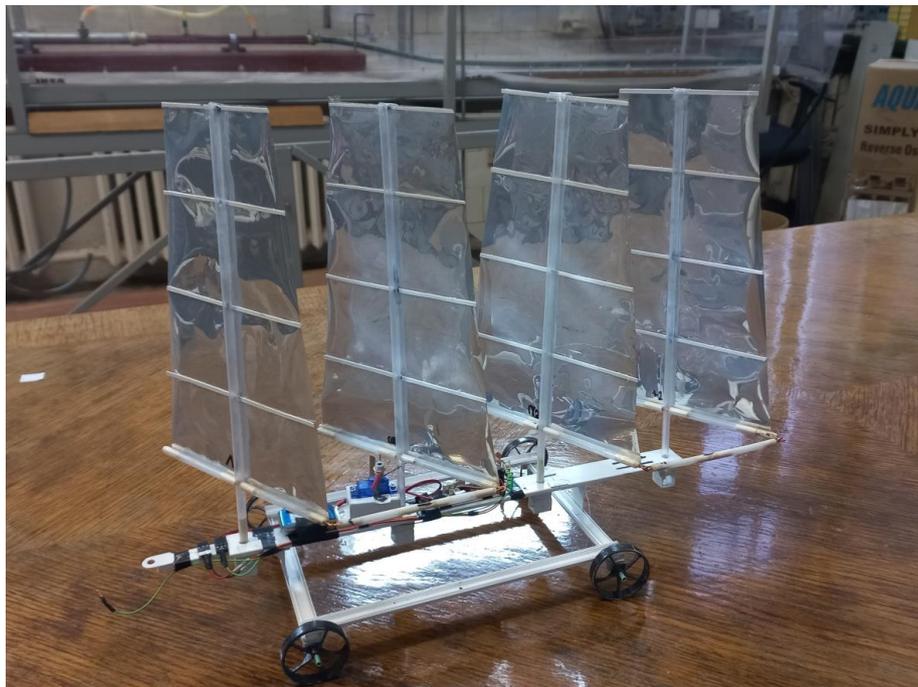


Рис. 3. Платформа с парусами.

Генератор ветрового потока и эстакады находились на горизонтальной плоскости длиной 3 метра и шириной 1,2 м. Траектория движения платформ задавалась направляющей системой, которая включала направляющий рельс и 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. При таком расположении колес платформы свободно перемещались вдоль направляющего рельса.

4 Результаты экспериментов и обсуждение

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов по разработанной методике проводилось прямое измерение сил, действующих на платформу. Чтобы оценить достоверность полученных результатов была проведена вторая серия экспериментов, в которой величина действующих на платформу сил определялась путем нахождения скоростей движения платформы с грузами разного веса по методике, описанной в статье [11].

Эксперименты первой серии проводились в два этапа. На первом этапе измерялось точное значение величины коэффициента трения при движении платформы с грузами 1 разной величины, которые клали на платформу. При выключенном генераторе ветрового потока для каждого груза 1 подбиралась такая величина груза 2, подвешенного на перекинутой через блок нити, при которой платформа начинала двигаться по эстакаде медленно с постоянной скоростью. Определив величину груза 1 и зная величину массы платформ равную 183 г вычисляем величину коэффициента трения: $k_T = 0,022$.

На втором этапе включался генератор ветрового потока, и для каждого груза 1 подбиралась величина груза 2, при которой платформа начинала двигаться медленно с постоянной скоростью. В первом случае с помощью груза 2 определялась величина силы трения, действующая на платформу, а во втором случае вес груза 2 показывал разницу аэродинамической силы, действующей на паруса платформы, и силы трения при равномерном движении по эстакаде, что следует из векторного равенства (1):

$$\vec{F} + \vec{F}_T + \vec{F}_C = \mathbf{0} \quad (1)$$

где F - аэродинамическая сила ветрового потока, действующая на паруса платформы,

F_T - сила трения,

F_C - сила сопротивления воздуха, действующая на паруса при её равномерном перемещении.

Из равенства (1) следует, что F - величина аэродинамической силы ветрового потока, действующей на паруса платформы, численно равна сумме сил трения F_T и силы сопротивления F_C

$$F = F_T + F_C$$

В таблице 1 представлены значения величин действующих на платформу сил, полученные прямым измерением для платформы с грузами 1 разного веса.

Таблица 1. Значения величин действующих на платформу сил, полученные прямым измерением для платформы с грузами 1 разного веса.

Вес груза 1, г	0	60	120
Величина силы $F - F_T$, г	4,2	3,0	1,6
Величина силы трения F_T , г	4,1	5,3	6,6
Величина силы F , г	8,3	8,3	8,2

В результате проведения экспериментов второй серии были получены значения скоростей платформы при движении с грузами 1 разного веса. Полученные значения скоростей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Величины скоростей платформы при движении с грузами 1 разного веса.

Вес груза 1 г	0	30	60	90	120
Скорость платформы см/с	40	35	30	26	20

В равенстве (1) сила трения F_T определяется выражением $F_T = k_T m g$, где k_T - коэффициент трения, а сила сопротивления F_C выражением $F_C = k_C V^2$, где k_C - коэффициент сопротивления.

Используя равенство (1) для двух грузов с массами m_1 и m_2 можно написать соотношение:

$$k_T(m_2 - m_1)g = k_C(V_1^2 - V_2^2) \quad (2)$$

$$k_C = k_T \Delta m g / \Delta V^2 \quad (3)$$

Подставляя в соотношение (3) данные из таблицы 2 для скоростей двух грузов получаем значение коэффициента сопротивления $k_C = 0,0023 \text{ г } \text{с}^2 / \text{см}^2$. Используя значения коэффициента трения и коэффициента сопротивления получаем величину аэродинамической силы F воздействия ветрового потока на 3 паруса платформы

$$F = 7,7 \text{ г} = 0,077 \text{ н}$$

Величина силы F , полученная прямым измерением, оказывается немного больше величины силы, вычисленной через определение скорости движения платформы с грузами 1 разного веса. Одной из причин разницы значений может быть сила трения в блоке, через который перекинута нить с грузом 2. Причина полученной разницы значений сил будет исследоваться в последующих экспериментах.

Зная величину аэродинамической силы F , полученную двумя способами, можно определить мощность $W = F V$, развиваемую этой силой:

$$W = 0,033 \text{ ватт} = 0,031 \text{ н}$$

5 Выводы

Разработан метод точного измерения величины коэффициента трения парусной платформы, который был использован для прямого измерения действующих на неё сил. Для верификации полученных значений сил, было проведено вычисление действующих на платформу сил путем определения скорости платформы при движении с грузами различного веса. Сравнение показало, что оба метода можно использовать для нахождения величины сил, действующих на платформу, однако значения, полученные разными методами, немного различаются. Выяснение причины небольшой разницы значений является задачей следующих экспериментов.

Литература

1. П. Дигай. Под парусами по рельсам //Yachtrussia.com/articlts/2016/10/21/articlts_391.html
2. Global Wind Report 2021 <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
3. Чебоксаров В.В., Кузнецов Н.Н.// Гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки//Строительство и технологическая безопасность. №18(70)-2020. С.67-81
4. Патент № 2722760 РФ, МПК В63В 35/44 (2006.1) / Парусная энергетическая установка, преобразующая энергию потоков двух сред; № 2019136097, Заяв. 2019.11.11 / Соловьев А.А., Чекарев К.В., Соловьев Д.А. – заявители и правообладатели // «Изобретения. Полезные модели». 2020. № 16.
5. Патент № 2745173 РФ, МПК В63В 35/44 (2006.01) / Парусная энергетическая установка; № 2020128596, заявл. 2020.08.28 / Чекарев К.В., Дегтярев К.С., Залиханов А.М. – заявители и правообладатели // «Изобретения. Полезные модели». 2021. № 9.
6. Патент № 2779605 РФ, МПК В63В 35/44 (200.01) / Парусная энергетическая установка с автоматической системой управления её движением / № 2022107300, Заявл. 21.03.2022 / Чекарев К.В., Березкин М.Ю., Залиханов А.М. - заявители и правообладатели // «Изобретения. Полезные модели». 2022. № 26.
7. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. Парусная энергетическая установка//География возобновляемых источников энергии. ИД Энергия. Москва 2021, сс. 180-197 .
8. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
9. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования// Окружающая среда и энерговедение: №2 (14) . 2022. С.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>
10. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энерговедение № 3 (15), 2022, сс. 67-79. <http://jeees.ru/category/journal/2022-3/>

11. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение коэффициента эффективности//Окружающая среда и энергосодержание: №1 (17), 2023, сс. 78-89. <http://jееes.ru/category/journal/2023-1/>

References

1. Digaj P. Pod parusami po rel'sam// Yachrussia.com/articlts/2016/10/21/ arti-clts_391.ktml
2. Global Wind Report 2021 <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
3. Cheboksarov V.V., Kuznecov N.N. Gibridnye vetro-solnechnye morskije energeticheskie ustanovki // Stroitel'stvo I tekhnologicheskaya bezopasnost'. №18 (70), 2020. S.67-81.
4. Patent RU 2722760 C1, B63B 35/44 (2006.1) / Sailing Power Plant Converting Flow Energy of Two Media / Application # 2019136097, 2019.11.11 / Solovev A.A., Chekarev K.V., Solovev D.A. – inventors and proprietors // Izobretenija, Poleznyja modeli / 2020 / # 16.
5. Patent RU 2745173 C1 / B63B 35/44 (2006.01) / Sailing power plant / Application: # 2020128596, 2020.08.28 / Chekarev K.V., Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M. – inventors and proprietors // Izobretenija, Poleznyja modeli / 2021, # 9.
6. Patent RU 2779605 C1/ B63B 35/44 (200.01) / Sailing Power Plant With Automatic Control System of its Movement / Application: # 2022107300, 21.03.2022 / Chekarev K.V., Be-rezkin M.Y., Zalikhanov A.M. – inventors and proprietors // Izobretenija, Poleznyja modeli / 2022, # 26.
7. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., Degtyarev K.S. Parusnye energeticheskie ustanovki. // Geografiya vozobnovlyaemyh istochnikov energii. ID «Energiya», M., 2021. S.180-197.
8. Patent RU 2125182 C1 / F 03 D 5/04 / Wind-electric Power Plant /Application: # 96123627/06, 16.12.1996 / Tsybul'nikov S.I. - inventor and proprietor //
9. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazi-rovaniya // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №2 (14), 2022. S.77-90. <http://jееes.ru/category/journal/2022-2/>
10. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazi-rovaniya: nakhojdenie velichiny sil, deistvuiuschih na platformu // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №3 (15), 2022. S.67-79. <http://jееes.ru/category/journal/2022-3/>
11. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazi-rovaniya: opredelenie koeffitshienta effektivnosti. // Okruzhayushchaya sreda I ener-govedenie. №1 (17), 2023. S.78-89. <http://jееes.ru/category/journal/2023-1/>

Land-Based Sailing Power Plant: a Method of Direct Measurement of Forces Acting on Platforms

Konstantin Chekarev^{1,2}

Alim Zalikhanov^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: konstantintchekarev@yandex.ru,

³E-mail: bulungu@yandex.ru

Abstract. High-power installations that convert kinetic wind energy into electricity have large dimensions due to the low air density, which leads to the need to construct large structures when using wind wheels with a horizontal axis of rotation in installations. A variant of a land-based sailing power plant is proposed, in which the problem associated with the large size of wind energy converters is removed. An experimental installation was developed and created to conduct research on models of a land-based sailing power plant, including platforms with sails mounted on them. The conducted experimental studies have shown the operability of the systems included in the experimental installation, structural elements have been found that can be used in the implementation of a land-based sailing installation. A method of direct measurement of the forces acting on the platform has been developed, which makes it possible to determine the efficiency coefficient of using the kinetic energy of the air flow. The results of the research are presented in this article.

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

Парусные энергетические установки наземного базирования: география использования

Залиханов Алим Михайлович^{[0000-0002-2540-6045]1,2}

Чекарев Константин Владимирович^{[0000-0002-5140-5142]1,3}

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

²E-mail:bulungu@yandex.ru

³E-mail:konstantintchekarev@yandex.ru

Аннотация. Установки, преобразующие кинетическую энергию ветра в электроэнергию, из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры. Известен вариант парусной энергетической установки, преобразующей энергию ветрового потока в энергию водного потока, который позволяет уменьшить размеры преобразователя энергии, однако при этом возникают сложности при передаче вырабатываемой электроэнергии внешнему потребителю. Предложен вариант парусной энергетической установки наземного базирования, в которой эта проблема снимается. В ходе проведения лабораторных исследований были найдены элементы конструкции, которые могут быть использованы при реализации парусной установки наземного базирования, разработана система передачи вырабатываемой электроэнергии по контактному рельсу. Конструктивные особенности парусных энергетических установок наземного базирования позволяют расширить географическую область использования ветроэнергетических установок и сооружать их в местах, где установки традиционного типа не могут использоваться. Результаты исследования особенностей географических областей, где могут быть использованы парусные энергетические установки наземного базирования представлены в данной статье.

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

1 Введение

Актуальной проблемой современности является использование возобновляемых источников энергии для получения электроэнергии. Происходит бурное развитие технологий, разработка новых методов, материалов, развитие элементной базы и т.д. Осваиваются новые территории для строительства солнечных станций, ветропарков, приливных станций и других энергообъектов. География строительства установок в возобновляемой энергетике весьма обширна – от пустынь и ледников Антарктиды до высокогорий и морских мелководий. Изучение территорий для определения их потенциала в возобновляемой энергетике является актуальной задачей. Одним из возобновляемых источников, наиболее широко используемых для получения электроэнергии, является ветровая энергия. Вместе с тем, использование кинетической энергии ветра в хозяйственной деятельности насчитывает много веков. Преобразователи энергии ветра в виде ветроколеса использовались только на суше для совершения работы, а преобразователи ветровой энергии в виде паруса использовались в основном на воде для перемещения транспортных средств. Есть много примеров использования парусов для перемещения транспортных средств на суше, но это направление развития не получило. Активное развитие в последние десятилетия новых методов, разработка широкого ряда ветроустановок различного типа позволило строить и успешно эксплуатировать такие энергетические установки в самых различных географических районах и природных условиях. Большой технический и технологический потенциал имеют наземные парусные энергетические установки, имеющие свои уникальные особенности. Изучение физико-географических, экономико-географических, инженерно-геологических и других условий географических областей в которых возможно строительство наземных парусных энергоустановок представляется актуальным.

2 Актуальность исследований и постановка цели

Существуют несколько разработок морских парусных ветроэнергетических установок. Известен вариант морской ветроэнергетической установки повышенной мощности, в которой система жестких парусов удерживается на поверхности воды кольцевым понтоном, который вращается вокруг вертикальной оси [2]. В предлагаемой конструкции энергетической установки проблема создания прочного основания для 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 волновое воздействие разрушает конструкцию.

Нами были предложены варианты парусной энергетической установки, также позволяющей снять проблему больших размеров преобразователя энергии ветрового потока и проблему устойчивости волновому воздействию [3, 4, 5]. Предложенные варианты энергетической установки содержат 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 гидрогенератора. Катамаран движется циклично по дуговой траектории в заданном угловом интервале, что позволяет увеличить эффективность преобразования энергии ветрового потока. Для движения по такой траектории катамаран выполнен в виде конструкции, симметричной относительно носа и кормы, соединен электрическим кабелем и тросом с бумом, закрепленным на дне водоема, и имеет систему изменения положения парусов и систему управления движением катамарана. Жесткое соединение катамарана с бумом с помощью троса позволяет катамарану двигаться по дуговой траектории. Такое движение позволяет автоматизировать этот процесс [5]. В предлагаемых вариантах энергетических установок их эффективность также оказывается низкой, поскольку часть энергии ветрового потока расходуется на преодоление сопротивления водной среды при перемещении катамарана. Кроме этого, возникают сложности с передачей вырабатываемой электроэнергии внешнему потребителю.

Эффективность парусной энергетической установки можно повысить, и при этом снять проблему передачи вырабатываемой электроэнергии внешнему потребителю, если создать парусную энергетическую установку наземного базирования. Эффективность энергетической установки может быть повышена за счет того, что отсутствует сопротивление при перемещении установки в водной среде, при этом вырабатываемую электроэнергию можно передавать внешнему потребителю по контактному рельсу.

Известен вариант конструкции парусной энергетической установки наземного базирования [6], который является сухопутным аналогом ветроэнергетической морской установки [2]. Установка содержит платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по прямолинейному рельсовому пути. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электроэнергия вырабатывается с помощью электрогенераторов, соединенных с колесами платформ. Как и ветроэнергетическая морская установка [2], предлагаемая конструкция может работать только при большом диаметре рельсового пути, поскольку при малых диаметрах система наветренных парусов будет перекрывать систему парусов, расположенную за ней. Эффективность преобразования энергии ветрового потока, при этом, будет низкой, поскольку на половине пути платформы перемещаются под острым углом к направлению ветра.

Эффективность парусной энергетической установки наземного базирования можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ так, как это сделано в парусной энергетической установке [3]. Это означает, что платформы должны двигаться циклично в заданном интервале перемещений и иметь систему изменения положения парусов и систему управления движением платформ для того, чтобы платформы начинали двигаться в противоположную сторону в точках, ограничивающих интервал перемещений платформ. Конструктивные особенности этого варианта парусной энергетической установки позволяют расширить область использования ветроэнергетических установок и сооружать их в тех местах, где энергетические установки традиционного типа не могут использоваться из-за состояния грунта.

Платформа движется под действием аэродинамических сил, действующих на паруса. Важным параметром установки является ее эффективность. Соотношение мощности, развиваемой этой силой, и энергии ветра, поступающей на паруса в единицу времени, определяет коэффициент эффективности. В проведенных нами исследованиях было установлено, что коэффициент эффективности составляет 0,43. Мощность определяется формулой $W = F V$. Величина аэродинамической силы F определяется площадью парусов, которую можно варьировать. V – скорость платформы. Траектория движения платформ выбирается такой, чтобы скорость движения была максимальной при любом изменении направления ветра. В проведенных нами экспериментах скорость от генератора ветрового потока была 1,8 м/с. Соответственно, рассчитанный коэффициент эффективности был получен при этой скорости ветра.

3 Особенности наземных парусных ветроэнергетических установок

Разработанные парусные энергетические установки наземного базирования имеют ряд особенностей.

Основными особенностями являются:

1) модульность конструкции обеспечивает возможность изменять технические параметры, например, варьировать мощность в зависимости от требований, монтировать установку в месте эксплуатации обычными автокранами и другой передвижной автотехникой;

2) простота конструкции установки. Типовые элементы платформ, свай и др., отсутствие сложных и дорогих электронных компонентов, технически сложных элементов и т.д., значительно удешевляет производство;

3) работа установки может быть автоматизирована различными способами;

4) удобная логистика – из-за модульности и особенностей конструкции (простота всех составляющих) она может быть доставлена частями на место строительства;

5) установку при необходимости возможно оперативно передислоцировать на другое место с использованием обычных грузовых транспортных средств.

4 Критерии выбора территорий, перспективных для использования наземных парусных ветроустановок

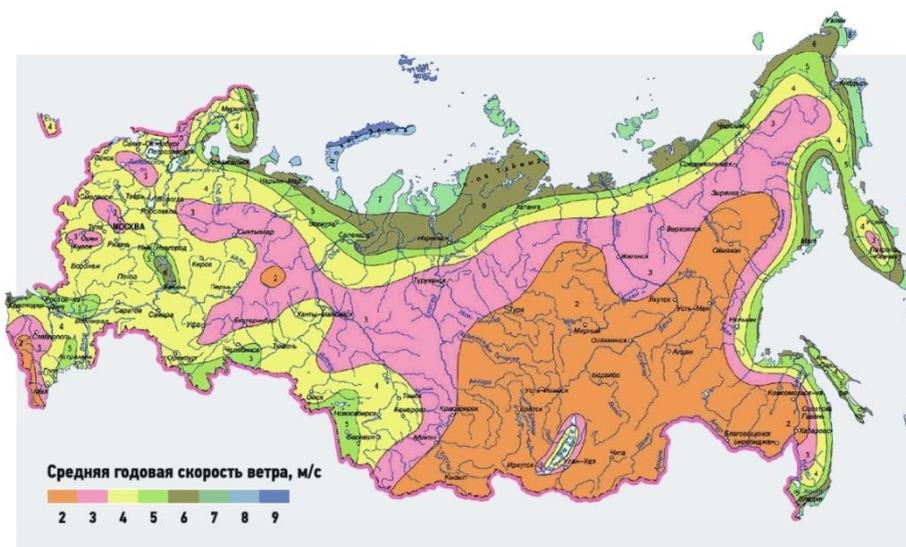
Перечисленные выше особенности парусных энергетических ветроустановок наземного базирования позволяют определить критерии для выбора территорий, перспективных для их размещения.

Таковыми критериями могут являться:

- 1) Наличие достаточного для работы установки ветропотенциала;
- 2) Территории, на которых из-за свойств грунтов строительство традиционных типов ветроустановок невозможно или экономически невыгодно;
- 3) наличие потенциальных потребителей электроэнергии, которую будет вырабатывать наземная парусная ветроустановка.

Рассмотрим территорию Российской Федерации относительно этих критериев.

Ветропотенциал территории России представлен на Рис. 1. На этой карте показано районирование России по средней годовой скорости ветра [12].



Районирование территории Российской Федерации по средней годовой скорости ветра

Рис. 1. Распределение средней годовой скорости ветра на территории России [12].

Как известно, при увеличении высоты над поверхностью, скорости ветра повышаются. При строительстве наземных парусных ветроустановок должны учитываться скорости ветра на высотах до 10 - 15 метров, в зависимости от

конструкции и вертикальных размеров парусов. Поэтому при выборе мест строительства ветроустановок данного типа, наиболее информативно использование карт районирования скоростей ветра на высоте 10 метров над поверхностью. Особенно можно выделить две обширные территории – Заполярье и Дальний Восток. На Рис. 2 а. представлена карта среднегодовой скорости ветра на высоте 10 метров на побережьях арктических морей России и северных островах [13, с измен.]. Практически на всех прибрежных участках и на островах среднегодовые скорости ветра выше 5 м/с. Видно, так же, что на островах архипелагов Северная Земля, Новая Земля и ряде других, среднегодовые скорости ветра выше 8 м/с.

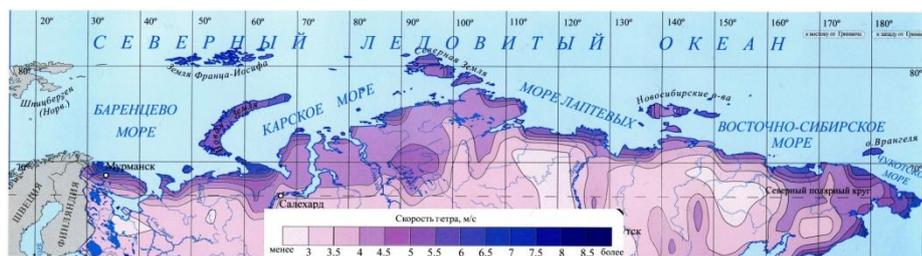


Рис. 2. Среднегодовая скорость ветра высоте 10 м в заполярных областях Российской Федерации [13, с измен.].

На Рис. 2 б. представлена карта прибрежная часть Дальнего Востока России и островов морей этой части Тихого океана [13, с измен.]. Можно отметить наличие прибрежных областей с высокими (свыше 6 м/с) среднегодовыми скоростями ветра на Чукотке, Камчатке, а так же Острове Сахалин, Курильских островах.

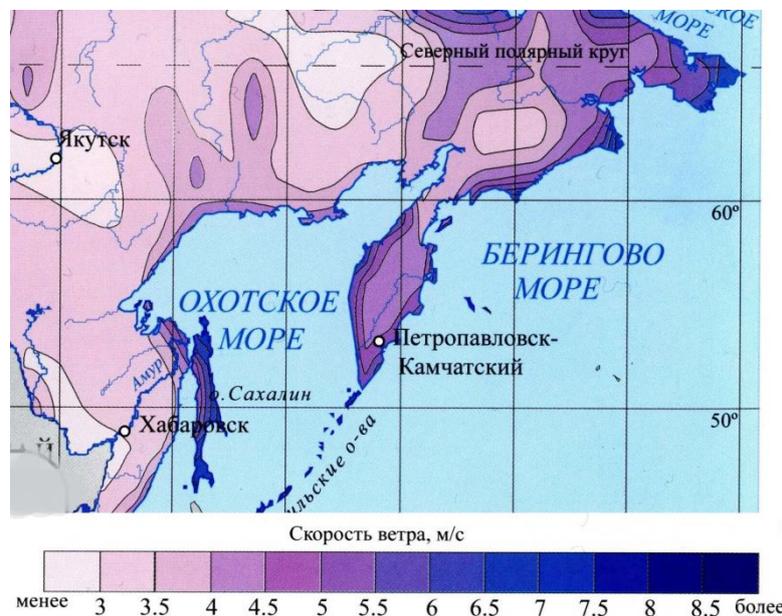


Рис. 2. Среднегодовая скорость ветра высоте 10 м на Дальнем Востоке России [13, с измен.].

При выборе мест благоприятных для строительства парусных наземных энергетических установок необходимо учитывать и возможность строительства более экономически выгодных энергоустановок использующих другие возобновляемые источники энергии, в особенности, солнечную энергию. Как известно, конкуренция со стороны солнечных энергоустановок значительно усилилась в последнее десятилетие в связи с резким падением себестоимости солнечных панелей и другими технологическими инновациями в этой области энергетики. Поэтому, актуально изучение районов с низкими значениями поступающей солнечной радиации при выборе территорий благоприятных для строительства парусных ветроустановок. На Рис. 3 карта суммарной годовой солнечной радиации [13]. Следует отметить высокий гелиопотенциал на тех территориях, кроме северных (арктических), на которых при использовании солнечных электростанций может составлять серьезную конкуренцию ветроэнергетике в этих районах.



Рис. 3. Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность (в год) [13].

Анализ данных распределения скоростей ветра на высоте 10 м (Рис. 2) выявляет ряд территорий России более с высокими (выше 5,5 м/с.) скоростями ветра – это, в основном, побережья морей Сев. Ледовитого и Тихого океанов, арктические острова, Курильские острова, о. Сахалин, п-ов Камчатка, степные и пустынные районы на юге России – республики Калмыкия, Дагестан, Астраханская и Волгоградская области.

Большое значение при выборе мест строительства наземных парусных ветроэнергетических установок имеют инженерно-геологические условия, в особенности, такие как сложные грунты – обводненные, подверженные эрозии, карсту, многолетнемерзлые и т.д. На большинстве таких территорий возможно строительство и эксплуатация наземных парусных энергоустановок. Проблемы строительства наземных парусных ветроустановок на сложных грунтах позволяет решить использование эстакад, установленных на сваях. Такое техническое решение позволяет устанавливать парусные ветроустановки даже на заболоченных, затопляемых территориях, мелководьях озер, рек, водохранилищ, на песчаных, глинистых, галечниковых берегах морей, рек и озер.

На территории Российской Федерации можно выделить обширные районы с вечной мерзлотой (многолетнемерзлыми грунтами), болот и затопляемых территорий, протяженные береговые линии морей, озер, рек с глинистыми и песчаными отложениями, песчаные пустыни и полупустыни, лёссовые равнины подверженные эрозии и т.д.

Особенное значение для нашей страны имеют районы вечной мерзлоты. Территории, которые занимают многолетнемерзлые породы весьма значительна – 11 млн. км² [14]. Сам возраст таких грунтов может быть значителен – до 1 млн. лет, но верхние горизонты обычно оттаивают в летний период, особенно этот процесс усилился в последние десятилетия в связи с глобальными изменениями климата, вызванного в основном астрономическими, а также антропогенными факторами [15]. Отмечается массовые деформации технических и строительных

конструкций в населенных пунктах, расположенных в этой зоне [16]. Процессы связанные с деградацией вечной мерзлоты и почв территорий с вечной мерзлотой носят массовый характер, вызывая многочисленные технические проблемы освоения и эксплуатации этой зоны.

На Рис. 4 изображена схема распространения вечной мерзлоты на территории России [17].



Рис 4. Карта распространения многолетнемерзлых пород (вечной мерзлоты) на территории России [17].

Большие площади в России занимают болота и подтопьяемые территории. На Рис. 5 изображена карта болот [18].



Рис. 5. Карта болот на территории России [18].

Болота занимают значительную площадь на территории России – 62,3 млн.га, а с учетом заболоченных земель – около 100 млн.га (1 млн. км²) [11]. Наибольшая заболоченность наблюдается в Зап.Сибири – в некоторых частях – до 70 % площадей. Как правило, средняя толщина водно-торфяных слоев северных болот и заболоченных территорий не превышает 10 м., под которыми находятся подстилающие породы обычно ледникового и водно-ледникового происхождения, достаточно прочные чтобы установить на них платформу на сваях. Часто в районах Крайнего Севера под заболоченными территориями и мелководными озерами находятся многолетнемерзлые грунты.

Парусные ветроэнергетические установки наземного базирования можно эффективно использовать как по берегам рек севера Европейской части страны, Сибири, Дальнего Востока, так и на островах в низовьях, дельтах этих рек для снабжения небольших энергопотребителей, в тех районах где не наблюдается катастрофических паводковых, селевых и штормовых явлений.

Высокий ветропотенциал наблюдается на арктических островах, территориях вдоль берегов морей Северного Ледовитого от Мурманской области до Чукотки и Тихого океанов, Курильских островов и Сахалина, Камчатки. Среднегодовые скорости ветра весьма значительны – 5-7,5 м/с, а в ряде мест, например, на Земле Франца-Иосифа, Чукотке и др. – свыше 8,5 м.с. Такие природные особенности заполярных, особенно севернее 70° с.ш., территорий, как полярная ночь зимой, малое число солнечных дней, и, как следствие, малое количество поступающей солнечной энергии на поверхность - менее 1,5 кВт ч/м² в день (Рис. 2), на позволяет использовать солнечные электростанции. При этом, характеристики ветрового режима этих территорий наиболее благоприятны для круглогодичного

использования ветроэнергетических установок различных типов, в том числе и парусных.

Значительные территории занимают пустыни, полупустыни, степи (Рис. 6 [19]). Площади, занимаемые в нашей стране пустынями и полупустынями значительно меньше чем площади болот и вечной мерзлоты. Но в ряде субъектах РФ занимают значительные площади. Особенно в Калмыкии, Дагестане, Волгоградский и Астраханской областях. Во всех этих субъектах отмечается высокий ветровой потенциал. В частности, в Республике Калмыкия – 66 млн. кВт ч [20]. Активное строительство ветропарков и отдельных ветроустановок башенного типа в Калмыкии в прошедшие 20-25 лет в последние годы сильно снизилось. Одной из причин этого является их сложность и дороговизна установки на неустойчивых грунтах. Предлагаемая нами парусная ветроустановка позволяет избежать подобной проблемы при строительстве и эксплуатации энергоустановки.

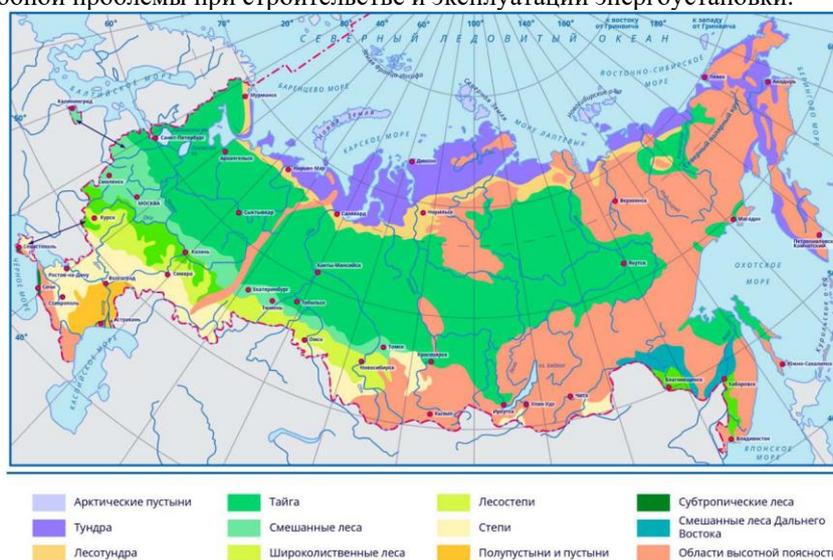


Рис 6. Карта (схема) распространности пустынь и полупустынь в РФ [19].

Важным фактором, влияющим на размещение ветроэнергетических установок является наличие потенциальных потребителей электроэнергии. Такими потребителями могут быть небольшие населенные пункты, временные поселения и стойбища или отдельные организации, такие как геолого-разведочные и др.

Большое разнообразие потребителей имеется в северных и арктических регионах, обусловленное отсутствием централизованного электроснабжения на гигантских территориях. Важными потребителями являются военные объекты, погранзаставы, научно-исследовательские экспедиции, в том числе, на дрейфующих льдинах, гидрометпосты в устьях северных рек, арктических островах, в зоне Северного Морского Пути, небольшие населенные пункты, геолого-

разведочные партии, золотодобывающие артели, зверо- и рыбопромысловые бригады, крупные стойбища коренных народов и др.

В пустынных районах это, помимо небольших населенных пунктов, сельскохозяйственные артели, животноводческие артели, фермерские хозяйства.

Совокупность рассмотренных факторов определяющих наиболее благоприятные условия для строительства и эксплуатации парусных энергетических ветроустановок показывает возможность использования данных установок на значительной территории Российской Федерации. Наиболее предпочтительными районами по выше приведенным критериям оказываются территории побережий арктических морей и островов.

5 Выводы

Согласно использованным критериям оценки территории России и методики, были:

1. определены возможные конструктивные решения наземных парусных ветроэнергетических установок, пригодные для использования в различных природных зонах;
2. установлены факторы отбора территорий на которых можно устанавливать и эффективно эксплуатировать наземные парусные энергоустановки;
3. определены некоторые территории наиболее благоприятные для строительства наземных парусных ветроэнергетических установок.

Сравнительный анализ рассмотренных регионов Российской Федерации, позволяет, опираясь на установленные выше критерии отбора наиболее перспективных для строительства наземных парусных ветроэнергетических установок, сделать вывод о высокой перспективности строительства этого типа ветроустановок в северных районах, особенно на арктических островах и побережьях арктических морей – областях, выделяющихся высоким ветропотенциалом и очень низким потенциалом солнечной энергии, и имеющих потенциальных потребителей для вырабатываемой электроэнергии.

Литература

1. https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html
2. Чебоксаров В.В., Кузнецов Н.Н. Гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки // Строительство и технологическая безопасность. №18 (70), 2020. С.67-81.
3. Патент № 2745173 РФ, МПК В63В 35/44 (2006.01) / Парусная энергетическая установка; № 2020128596, заявл. 2020.08.28 / Чекарев К.В., Дегтярев К.С., Залиханов А.М. – заявители и правообладатели // «Изобретения. Полезные модели». 2021. № 9
4. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Катамаран как парусная энергетическая установка: увеличение скоростных характеристик. // Окружающая среда и энерговедение. №2 (10), 2021, с. 96-107.

5. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. Парусные энергетические установки. // География возобновляемых источников энергии. ИД «Энергия», М., 2021. С.180-197.
6. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
7. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования. // Окружающая среда и энергосистемы. №2 (14), 2022. С.77-90. [http://jeees.ru /category/journal/2022-2/](http://jeees.ru/category/journal/2022-2/)
8. Аэродинамика и гидродинамика. sea-man.org/aerodinamuka-parusa
9. <https://inauka.ru/sport/2022/12/13/komanda-novoi-zelandii-ystanovila-rekord-nazemnoi-skorosti-na-vetrodvigateliah/>
10. Берёзкин М.Ю., Залиханов А.М., Чекарев К.В. Парусные энергетические установки: экспериментальные исследования. // Процессы в геосредах. №1, 2023. С.1960-1967.
11. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Соловьев Д.А. Автономная парусная энергетическая установка. // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). № 34, 2022.
12. Дегтярев К.С. Возобновляемая энергетика в Калмыкии: опыт, проблемы и перспективы региона. // Сантехника, отопление, кондиционирование. № 7, 2017.
13. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М., 2010.
14. Экологический энциклопедический словарь. ИД «Ноосфера», М., 2002 г., с.388.
15. Федоров В.М., Залиханов А.М., Фролов Д.М. Инсоляционная контрастность как фактор изменения глобального климата Земли. // Окружающая среда и энергосистемы. № 1 (17), 2023. С.44-65.
16. Нефедова Л.В., Соловьев А.А., Соловьев Д.А. Энергетическое обеспечение Арктической зоны России в условиях воздействия глобальных климатических изменений. // в Сб. «Энергосистемы, география и окружающая среда». ИД «Энергия», М., 2020 г., с. 114.
17. www/moya-planeta.ru
18. [www/biblioteka.ru/2-6-97-bolota-v-biosfere/16.htm](http://www.biblioteka.ru/2-6-97-bolota-v-biosfere/16.htm)
19. [www/mirvu.ru](http://www.mirvu.ru)
20. Дегтярев К.С., Сангаджиев М.М., Манджиева Т.В. Энергетика на возобновляемых источниках в республике Калмыкия – потенциал, опыт и перспективы. Изд-во КалмГУ. Элиста, 2020, с.16.

References

1. https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html
2. Cheboksarov V.V., Kuznecov N.N. Gibridnye vetro-solnechnye morskije energeticheskie ustanovki // Stroitel'stvo I tekhnologicheskaja bezopasnost'. №18 (70), 2020. p.67-81.
3. Patent RU 2745173 C1 / B63B 35/44 (2006.01) / Sailing power plant / Application: # 2020128596, 2020.08.28 / Chekarev K.V., Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M. – inventors and proprietors // Izobreteniya, Poleznyja modeli / 2021, # 9
4. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Katamaran kak parusnaya energeticheskaya ustanovka: uvlivenie skorostnykh harakteristik. // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №2 (10), 2021, p. 96-107.

5. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M., Degtyarev K.S. Parusnye energeticheskie ustanovki. // Geografiya vozobnovlyaemykh istochnikov energii. ID «Energiya», M., 2021. p.180-197.
6. Patent RU 2125182 C1 / F 03 D 5/04 / Wind-electric Power Plant /Application: # 96123627/06, 16.12.1996 / Tsybul'nikov S.I. - inventor and proprietor //
7. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo ba-zirovaniya // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №2 (14), 2022. p.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>
8. Aerodinamika I gidrodinamika. sea-man. org/aerodinamuka-parusa
9. <https://inauka.ru/sport/2022/12/13/komanda-novoi-zelandii-ystanovila-rekord-nazemnoi-skorosti-na-vetrodvigateliah/>
10. Berezkin M., Zalikhhanov A.M., Chekarev K.V. Parusnjia energeticheskie ustanovki: eksperimentalnaya issledovaniya. // Prosessy v geosredah. # 1, 2023, S. 1960-1967.
11. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M., Soloviev D.A. Avtonomnaya parusnaya energeticheskaya ustanovka. // Izobreniya. Poleznyia modeli. (ROSPATENT). # 34, 2022.
12. Degtyarev K.S. Vozobnovliaemaya energetika v Kalmykii: opyt, problem I perspektivy regiona. // Santehnika, otoplenie, konditsirovanie. #7, 2022.
13. Popel O.S., Frid S.E., Kolomiets U.G., Kiseleva S.V., Terehova E.N. Atlas resursov solnechnoi energii na territorii Rossii. Moskva, 2010.
14. Ekologicheskii entchiklopedicheskii slovar. ID “Noosfera”, M., 2002.
15. Feodorov V.M., Zalikhhanov A.M., Frolov D.M. Insoliatsionnaya kontrastnost kak factor izmeneniya globalnogo klimata Zemli. // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №1 (17), 2023. p.44-65. <http://jeees.ru/category/journal/2023-1/>
16. Nefedova L.V., Soloviev A.A., Soloviev D.A. Energeticheskoe obespechenie Arkticheskoi zony Rossii z uslovch vozdeistviya globalnykh klimaticheskikh izmenenii. // “Energovedenie, geografia I okruzhayushchaya sreda”. ID “Energiya”, M., 2020.
17. [www//moya-planeta.ru](http://moya-planeta.ru)
18. [www/bibliotekaar.ru/2-6-97-bolota-v-biosfere/16.htm](http://bibliotekaar.ru/2-6-97-bolota-v-biosfere/16.htm)
19. [www/mirvu.ru](http://www.mirvu.ru)
20. Degtyarev K.S., Sangadzhiev M.M., Mandzhiva T.V. Energetika na vozobnovliaemykh istochnikakh v respublike Kalmykia – potenchifl, opyt I perspektivy. Elista. 2020.

Land-Based Sailing Power Plant: Geography of Use

Alim Zalikhanov^{1,2}
Konstantin Chekarev^{1,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: bulungu@yandex.ru,

³E-mail: konstantintchekarev@yandex.ru

Abstract. Installations that convert kinetic wind energy into electricity have large dimensions due to the low air density. A variant of a sailing power plant is known that converts the energy of a wind stream into the energy of a water stream, which allows reducing the size of the energy converter, however, difficulties arise when transferring the generated electricity to an external consumer. A variant of a land-based sailing power plant is proposed, in which this problem is removed. In the course of laboratory research, structural elements were found that can be used in the implementation of a land-based sailing installation, a system for transmitting generated electricity along a contact rail was developed. The design features of land-based sailing power plants make it possible to expand the geographical area of use of wind power plants and to construct them in places where traditional-type installations cannot be used. The results of the study of the features of geographical areas where land-based sailing power plants can be used are presented in this article.

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