



2024
№3(23)

Окружающая среда и энерговедение

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)

2024 №3(23)

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.

С 12 февраля 2024 г. включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук ВАК Минобрнауки России по специальности 1.6.21. Геоэкология (географические науки).



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:

Бабулин Вячеслав Леонидович, д.г.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).

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).

Нефедова Людмила Вениаминовна (МГУ им. М. В. Ломоносова).

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. (ИО РАН).

Тикунов 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 энергоснабжение. 2024 №3(23)

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 28.09.2024.

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 энергоснабжение», 2024

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

Содержание

Гулев С.К., Соловьев Д.А.

Глобальные климатические изменения и роль России: новые
вызовы и решения COP284

Дегтярев К.С., Показеев К.В., Соловьев Д.А.

Влияние солнечной активности на долгосрочные
климатические изменения в Северном полушарии12

Садртинов К.Д.

Сравнение программ низкоуглеродного развития России и
Китая.....25

Синицын А.В.

Временные тренды общего балла облачности и его
составляющих в европейском секторе покрытия
геостационарного спутника METEOSAT в первой четверти XXI
века.....37

Сутаев М.М., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Самедова Н.С., Давудов
И.А., Светличная Т.В.

Оценка потенциала использования ветровой и солнечной
энергии в Республике Дагестан50

Фёдоров В.М.

Солнечная радиация и пространственные особенности общей
циркуляции атмосферы69

Чекарев К.В., Залиханов А.М.

Ветроэнергетическая установка с жёсткими парусами: прямое
измерение сил, действующих на платформу83

Content

Gulev S.K., Solovyev D.A.

Global Climate Change and Russia's Role: New Challenges and
Solutions from COP284

Degtyarev K.S., Pokazeev K.V., Solovyev D.A.

The Impact of Solar Activity on Long-Term Climate Changes in the
Northern Hemisphere12

Sadrtnin K.D.

Comparing Low-Carbon Development Programs in Russia
and China25

Sinitsyn A.V.

Temporal Trends of Total Cloud Cover and Its Components in the
European Sector Covered by the Geostationary Satellite METEOSAT
in the First Quarter of the 21st Century37

Sutaev M.M., Aliyev R.M., Badavov G.B., Samedova N.S., Davudov
I.A., Svetlichnaya T.V.

Assessment of the potential for the use of wind and solar energy
in the Republic of Dagestan50

Fedorov V.M.

Solar Radiation and Spatial Peculiarities of the General Circulation
of the Atmosphere69

Chekarev K.V., Zalikhonov A.M.

Wind Power Plant with Rigid Sails: Direct Measurement of Forces
Acting on the Platform83

УДК 551.583.7:061.2(100)

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-4-12

EDN: BTKZAF

Глобальные климатические изменения и роль России: новые вызовы и решения COP28

^{1,1}Гулев Сергей Константинович [0000-0002-4296-5121],
^{1,2}Соловьев Дмитрий Александрович [0000-0001-5591-3067]

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: ¹gul@sail.msk.ru; ²solovev@ocean.ru;

Аннотация. В статье освещаются ключевые моменты Конференции ООН по изменению климата (COP28), проведенной в Дубае, подчеркивается важность научных знаний и политической воли в решении глобальных климатических проблем. Особое внимание уделено роли России в глобальной борьбе с климатическими изменениями, учитывая её обширную территорию и потенциал для смягчения последствий этих изменений. Описываются серьезные проблемы и вызовы, с которыми сталкивается мировое сообщество, включая экстремальные погодные явления и их влияние на экономику и жизнь людей. Обсуждаются вопросы международного сотрудничества, важности технологий в борьбе с климатическими изменениями, а также стратегии для достижения устойчивого будущего, в том числе через переход к углеродно-нейтральной экономике и адаптацию к изменениям климата. В статье также рассматриваются инновационные решения и проекты, представленные российскими учеными, такие как карбоновые полигоны для мониторинга парниковых газов. В заключение подчеркивается, что несмотря на обсуждение и предложения на конференции, реальные действия по борьбе с глобальным потеплением остаются недостаточными, требуя более активных и эффективных шагов на международном уровне.

Ключевые слова: климатические изменения, COP28, углеродно-нейтральная экономика, международное сотрудничество, Россия и климат

На пороге критического десятилетия в борьбе с глобальными климатическими изменениями, Конференция ООН по изменению климата (COP28), проведенная в Дубае, оказалась в центре мирового внимания. Эта конференция символизировала сближение научных знаний и политической воли, направленных на решение одной из самых насущных проблем современности. В ходе конференции особое

внимание уделялось роли России в глобальной борьбе с климатическими изменениями, учитывая её огромную территорию и значительный потенциал для смягчения последствий этих изменений.

Конференция COP28 выявила ряд серьезных проблем и вызовов, с которыми сталкивается мировое сообщество. Одной из ключевых тем стало обсуждение усиления экстремальных погодных явлений и их влияния на экономику и жизнь людей. Ученые и политики обсуждали возможности смягчения этих изменений и поискали пути к более устойчивому будущему. В этом контексте, российские научные учреждения представили свои исследования и проекты, в том числе такие как карбоновые полигоны, которые являются частью глобальной системы мониторинга парниковых газов.

Основной акцент конференции был сделан на совместных усилиях и международном сотрудничестве. Обсуждения охватывали широкий спектр тем, от метеорологических изменений до экономических и политических стратегий в ответ на климатические вызовы. Ведущие эксперты подчеркнули, что решения, направленные на смягчение климатических изменений, должны быть глобальными и включать в себя как развитые, так и развивающиеся страны.

Эта конференция COP28 стала местом встречи для глав государств, политиков, ученых, представителей неправительственных организаций и активистов. Они собрались вместе, чтобы обменяться знаниями и опытом, а также для разработки совместных планов действий. В контексте растущего осознания угрозы, которую представляют изменения климата, участники конференции искали способы ускорения перехода к углеродно-нейтральной экономике и адаптации к уже неизбежным изменениям климата.

Особое внимание было уделено вопросам финансирования климатических мероприятий. В рамках дискуссий обсуждались варианты мобилизации финансовых ресурсов для поддержки развивающихся стран, которые наиболее уязвимы к последствиям климатических изменений. В этом аспекте Россия предложила ряд инициатив, направленных на развитие зеленых технологий и финансовых инструментов, способствующих сокращению выбросов парниковых газов.

Среди прочего, COP28 выделился обсуждением роли технологий в борьбе с изменением климата. Инновации в области возобновляемой энергетики, углеродного захвата и хранения, а также развитие устойчивого городского планирования были в центре внимания многих сессий. Участники пришли к выводу, что без интеграции технологических инноваций в экономику и социальную сферу, достижение целей Парижского соглашения останется недостижимым.

Российские ученые представили на саммите результаты деятельности карбоновых полигонов. Это проект, задача которого создание сети мониторинга потоков парниковых газов, которые оказывают существенное влияние на климат. Руководитель лаборатории Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН профессор Сергей Гулев (рис.1) в своем выступлении отметил, что в России пока создано 17 точек для исследования. Впоследствии система будет интегрирована на всю территорию страны [1].



Рис. 1. Профессор Сергей Гулев на саммите на климатической конференции ООН COP28 (2023) в Дубае. Источник: <https://ysia.ru/wp-content/uploads/2023/12/1701758719308-e1701829824125.jpg>

«Сейчас происходит не только общее потепление климата, которое наблюдается в настоящее время, это усиление повторяемости экстремальных явлений погоды, которые приносят вред не только народному хозяйству, но и жизни человечества. Цели, которые рассматриваются в сегодняшней повестке, ищут пути смягчения подобных изменений. Что важно, не только для России, как отдельно взятой страны, но и для всего человечества. Мы рассматриваем общие проблемы изменения климата, их причины, возможности их предсказывать, а также прикладные проблемы, связанные, например, с карбоновыми полигонами. Это большой проект, который посвящен попытке на всей территории России, используя возможности отдельных точек, организовать эффективный мониторинг климатически активных газов, в первую очередь CO₂», — сообщил Сергей Гулев в своем докладе на COP28.

По словам ученых, важно, чтобы о российской науке знали не только в России. Страна, обладающая такой огромной территорией, с точки зрения вопросов изменения климата, обладает и наибольшими возможностями, с помощью которых с климатическими изменениями можно бороться.

COP28, Конференция ООН по изменению климата, часто рассматривается как место для политических и экономических переговоров, имеющих мало общего с научными и фактическими аспектами климатических изменений. Например, существуют ограничения на использование самолетов для командировок по Европе, поощряя путешествия на поезде, но такие меры являются лишь незначительными. Аналогично, налог на углекислый газ, назначение которого остается неясным. В целом, ни в России, ни на мировом уровне не наблюдается значительных действий по решению проблемы глобального потепления.

Ключевым индикатором является кривая роста уровня парниковых газов (рис.2). Введенная тридцать лет назад, она изначально указывала на потенциальную связь между ростом температуры и антропогенными факторами. Со временем, эта связь стала более очевидной. Тем не менее, действий по борьбе с этим увеличением парниковых газов, растущим не линейно, а экспоненциально, предпринято мало.

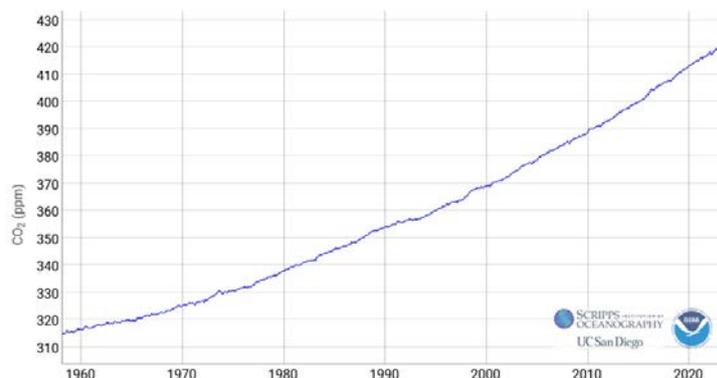


Рис. 2. Кривая роста уровня парниковых газов в атмосфере. Источник: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/graph.html>

Основные поставщики парниковых газов, такие как Индия, Китай и США, вряд ли предпримут эффективные шаги по их сокращению. Снижение концентрации парниковых газов может быть связано не только с уменьшением выбросов, но и с увеличением поглощающих их механизмов, например, лесов. При этом, даже гипотетическое снижение уровня парниковых газов не улучшит показатели экстремальных погодных событий и климатической циркуляции.

Океан, являющийся основным резервуаром избыточного тепла, будет продолжать нагреваться даже при снижении уровня парниковых газов из-за его высокой инерционности [2]. То же касается ледников, которые продолжают таять на протяжении тысяч лет после прекращения антропогенных выбросов.

Таким образом, даже при потенциальном понижении температуры приземного воздуха, последствия, такие как увеличение температуры океана и таяние ледников, продолжают нарушать баланс климатической системы. Хотя сценарий, подобный фильму "Послезавтра", маловероятен, глобальное потепление будет продолжаться из-за отсутствия реальных шагов к достижению углеродной нейтральности. Ожидается, что глобальная температура превысит порог в 1,5 градуса до 2040 года [3].

Необходимо предпринимать реальные шаги, а не ограничиваться торговлей квотами и соглашениями о кредитах и субсидиях. Несмотря на потенциальные усилия по снижению выбросов, фактических действий в этом направлении практически не наблюдается.

Сегодняшние изменения климата на Земле отличаются беспрецедентной скоростью и масштабом, особенно когда речь идет о повышении приземной температуры. Этот факт подтверждается всеми докладами Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), в том числе последним, шестым докладом, опубликованным в 2021 году [4]. Десятилетие 2011-2020 годов стало самым теплым за всю историю метеорологических наблюдений, при этом начиная с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего после 1850 года. В период 2011-2020 годов средняя приземная температура была на 1,1°C выше, чем в период 1850-1900 годов, причем потепление над сушей (1,59°C) было более значительным, чем над океанами (0,88°C). С 1976 по 2020 год средняя температура выросла на 0,8°C, средний темп роста составил 0,18°C за десятилетие [3].

Особенно остро проблема потепления затрагивает Россию, где рост приземной температуры значительно превышает мировой тренд. По данным третьего Оценочного Доклада Росгидромета 2022 года, температура в России растет почти вдвое быстрее, чем на суше в целом, на 0,51°C за десятилетие. Начиная с 1980-х годов, каждое десятилетие было теплее предыдущего, и из десяти самых теплых лет девять приходятся на XXI век.

Климатические изменения также характеризуются ростом влажности атмосферы, повышением температуры и теплосодержания океана, увеличением мирового уровня моря (более 3 мм в год за последние 30 лет), таянием ледников и уменьшением площади морских льдов (на 40% в Арктике за последние 40 лет). Эти изменения считаются беспрецедентными из-за их скорости. В истории Земли были периоды значительного потепления, но они происходили за десятки и сотни тысяч лет.

Изменения климата происходят неравномерно по всей планете. Температурные тренды сильнее в полярных и субполярных широтах, чем в тропиках. Особенно высокое повышение температуры океана наблюдается в западной части тропического Тихого океана и восточной части тропического Индийского океана. Уровень моря также повышается неравномерно, с максимальными трендами в тропиках и полярных широтах. В России средний тренд температуры за последнее столетие составляет 1,3°C, при этом максимальные изменения наблюдаются в северных приарктических регионах и на европейской части РФ, где они могут превышать 2°C [5]. В последние десятилетия тенденции изменений климата значительно усилились, особенно это касается регионов Арктики.

Таким образом, анализ климатических изменений должен учитывать долгосрочные тренды и их глобальный характер, при этом региональные изменения, оказывающие влияние на инфраструктуру и жизнь людей, также подлежат тщательному изучению.

Последствия климатических изменений на Земле, хотя и сложно отделяемы от самих климатических изменений из-за взаимосвязанных обратных связей, включают ряд ключевых факторов, влияющих на природные процессы. Во-первых, наблюдается значительное изменение в частоте и силе экстремальных погодных явлений, включая осадки и связанные с ними наводнения, а также засухи. Во многих местах мира, особенно в средних широтах и в России, хотя средний уровень

осадков может оставаться относительно стабильным, большое количество осадков имеет тенденцию выпадать в короткие периоды экстремальных дней, вызывая сильные наводнения. Повышение средней глобальной температуры ведет к изменениям в траекториях циклонов, увеличивая перенос влаги с океанов на континенты, что приводит к увеличению влажности в некоторых районах и сухости в других. Кроме того, изменения климата оказывают влияние на вечномёрзлые грунты. Площадь вечной мерзлоты в России сократилась на сотни тысяч квадратных километров, что влияет на инфраструктуру, возведенную на мерзлоте, так как таяние мерзлоты подрывает устойчивость зданий, дорог и прочих сооружений.

Влияние изменений климата также заметно в океане, особенно в сокращении площади арктических льдов [4]. За последние сорок лет площадь арктических льдов в сентябре (летний минимум) уменьшилась с 7,7 до 4,5 миллионов квадратных километров, потеряв около 40% летнего ледового покрова. Это изменение играет ключевую роль в усилении глобальных климатических изменений в Арктике за счет обратной связи между альбедо, температурой и притоком тепла из Северного ледовитого океана в атмосферу. Прогнозы предполагают, что эта тенденция сохранится в ближайшие десятилетия, значительно влияя на навигацию по Северному морскому пути, который может стать экономически выгодным маршрутом. Однако перспективы использования этого маршрута для транспортных перевозок требуют осторожного подхода. Прогнозы показывают, что к 2050 году при текущих тенденциях развития экономики можно ожидать полное исчезновение льда в Арктике летом, а при умеренных сценариях – Северный морской путь будет свободен от льда только летом. Однако такие периоды будут чередоваться с периодами повышенной ледовитости, и даже при «отсутствии льда» в прогнозах будет присутствовать плавающий лед.

Поводя итоги, следует отметить, что Конференция ООН по изменению климата (COP28) в Дубае выявила множество важных аспектов и проблем, связанных с глобальными климатическими изменениями.

В заключительном документе COP28 подчеркивается, что согласно научным данным для ограничения глобального потепления до 1,5 градуса Цельсия необходимо сократить глобальные выбросы парниковых газов на 43% к 2030 году по сравнению с уровнем 2019 года. В решении отмечается, что страны отстают от графика выполнения целей Парижского соглашения.

Итоговый документ призывает страны увеличить вклад в глобальное увеличение мощностей возобновляемой энергетики (в три раза) и удвоение глобальных среднегодовых темпов повышения энергоэффективности к 2030 году, ускорить усилия по сокращению производства электроэнергии на угольной основе без применения мер по сокращению выбросов, постепенно отказываться от неэффективных субсидий на ископаемое топливо и принимать другие меры для перехода от ископаемого топлива в энергетических системах справедливым, упорядоченным и равноправным образом. При этом развитые страны должны продолжать играть ведущую роль в этом процессе.

В краткосрочной перспективе странам рекомендуется представить новые амбициозные цели по сокращению выбросов, охватывающие все парниковые газы,

секторы экономики и категории, соответствующие цели Парижского соглашения в 1,5°C, в своих обновленных планах по борьбе с изменением климата (известных как Национально определенные вклады) к 2025 году.

Обсуждения в рамках COP28 подчеркнули, что проблемы климатических изменений требуют глобальных решений, которые включают в себя как развитые, так и развивающиеся страны. Важно, что Россия, обладая значительным потенциалом в сфере смягчения последствий климатических изменений, представила ряд инновационных проектов, и в том числе таких как карбоновые полигоны для мониторинга парниковых газов.

Тем не менее, конференция также выявила, что текущие усилия в борьбе с глобальным потеплением остаются недостаточными. Несмотря на значительное количество обсуждений и предложений, реальные действия для достижения углеродной нейтральности и снижения выбросов парниковых газов ограничиваются, что подчеркивает необходимость более активных и эффективных международных инициатив. COP28 подтвердила критическую важность научных знаний и политической воли в решении глобальных климатических проблем.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № FMWE-2024-0017)

Литература

1. Климатический саммит ООН: важно, чтобы о российской науке знали не только в России [Электронный ресурс]. . 2023 URL: <https://www.infotimes.ru/news/klimaticheskij-sammit-oon-vazhno-chtoby-o-rossiyskoy-nauke-znali-ne-tolko-v-rossii/> (дата обращения: 14.12.2023).
2. Гулев С.К. Глобальные изменения климата и мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № No 6, № 2023. С. 25–36. DOI:10.47711/0868-6351-201-25-36.
3. Changing State of the Climate System // Climate Change 2021 – The Physical Science Basis Cambridge University Press, 2023. С. 287–422.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis Cambridge University Press, 2023.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва: Росгидромет, 2023.

References

1. United Nations Climate Summit: It is Important that Russian Science is Known Not Only in Russia [Electronic resource]. 2023. URL: <https://www.infotimes.ru/news/klimaticheskij-sammit-oon-vazhno-chtoby-o-rossiyskoy-nauke-znali-ne-tolko-v-rossii/> (accessed: 14.12.2023).
2. Gulev S.K. Global Climate Change and the World Ocean // Problems of Forecasting. 2023. No. 6, No. 2023. P. 25–36. DOI:10.47711/0868-6351-201-25-36.

3. Changing State of the Climate System // Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2023. P. 287–422.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2023.
5. Report on Climate Features in the Territory of the Russian Federation for 2022. Moscow: Roshydromet, 2023.

Global Climate Change and Russia's Role: New Challenges and Solutions from COP28

^{1,1} Gulev Sergey,^{1,2} Solovyev Dmitry

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: ¹gul@sail.msk.ru; ²solovev@ocean.ru;

Abstract. The article highlights key aspects of the United Nations Climate Change Conference (COP28) held in Dubai, emphasizing the importance of scientific knowledge and political will in addressing global climate issues. Special attention is given to Russia's role in the global fight against climate change, considering its vast territory and potential to mitigate the effects of these changes. It describes the serious problems and challenges faced by the global community, including extreme weather events and their impact on the economy and people's lives. Issues of international cooperation, the importance of technology in combating climate change, and strategies for achieving a sustainable future, including the transition to a carbon-neutral economy and adaptation to climate changes, are discussed. The article also examines innovative solutions and projects presented by Russian scientists, such as carbon polygons for monitoring greenhouse gases. In conclusion, it emphasizes that despite the discussions and proposals at the conference, real actions to combat global warming remain insufficient, requiring more active and effective steps at the international level.

Key words: climate change, COP28, carbon-neutral economy, international cooperation, Russia and climate

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FMWE-2024-0017).

УДК 551.583.7:551.594

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-12-24

EDN: DGICWG

Влияние солнечной активности на долгосрочные климатические изменения в Северном полушарии

^{1,1} Дегтярев Кирилл Станиславович [0000-0002-1738-6320],^{1,2} Показеев Константин Васильевич [0000-0001-8062-2771],^{2,3} Соловьев Дмитрий Александрович [0000-0001-5591-3067]¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, РоссияE-mail: ¹kir1111@rambler.ru, ²sea@phys.msu.ru,
³solovev@ocean.ru

Аннотация. В статье приводится рассмотрение различных концепций, объясняющих изменения климата в прошлом и настоящем. Для анализа климатических событий прошлого используется ретроспективный анализ. Исследуются статистические показатели климата, получаемые в результате математической обработки метеорологических рядов, в частности аномалии температуры воздуха в Северном полушарии и уровня содержания CO₂ в атмосфере. Также проанализирован ход основных циклических компонент многолетних изменений солнечной активности и температурных аномалий в Северном полушарии за период 1900-2030 гг. Сравнение показало, что синхронизация между ними наблюдается для составляющих колебаний с периодом около 21 лет. На основе этого были получены нейронные прогнозы динамики температурных аномалий в Северном полушарии. Согласно полученным прогнозам, ожидается стабилизация роста аномалий температуры после 2024 года, с возможным трендом в сторону похолодания на фоне снижения уровня активности Солнца.

Ключевые слова: климат Земли, глобальное потепление, солнечная активность, нейронное прогнозирование, аномалии температуры воздуха

1 Введение

Вопрос изменений климата, его причин и последствий, в настоящее время чрезвычайно актуален и перешёл не только в практическую, но и политическую

плоскость, и является предметом острых дискуссий, нередко выходящих за пределы академической науки. Вместе с тем, в современных исследованиях зачастую не учитывается реальная картина изменений климата в голоцене, изученная и ставшая в значительной степени хрестоматийной и представленная, в том числе, в трудах отечественных исследователей, ставших палеографической классикой – в частности, в работах [1–4]. В связи с этим, в качестве введения в тему приведем основные вехи изменений природных условий в исторический период (таблица 1), сопровождая их привязкой к известным крупным историческим событиям [5,6].

Таблица 1. Основные вехи климатических изменений в исторический период [6].

Время	Природные условия	Исторические события
~20 000 лет назад	Пик Валдайского (Вислинского, Бюромского, Висконсинского) оледенения. Средние глобальные температуры на 5-6 °С ниже современных. Ледниковый покров на северо-западе Русской Равнины, севере Европы и Северной Америки. Уровень мирового океана на 100-120 метров ниже современного. После – эпоха сокращения ледниковых покровов, ряд стадий потепления (с крупными флюктуациями) и повышения уровня Мирового океана	
~ 6000 – 4000 лет назад	Климатический Оптимум голоцена. Средние глобальные температуры на 1-2 °С выше современных. Уровень мирового океана на 2-4 метра выше современного	Возникновение и развитие первых цивилизаций (в бассейнах Нила, Тигра и Евфрата, Инда)
~ 4000 лет назад	Колебания температур с общей тенденцией к снижению.	
~ 1000 лет назад	Средневековый климатический оптимум - пик около 1000 года (температура примерно равна температурам конца XX – начала XXI века)	Освоение на Руси междуречья Оки и Волги и викингами – Исландии
XIII – XVIII вв. н.э.	Малый ледниковый период – 13-18 вв.; пик похолодания около 1550 года (температура на 2 °С ниже современной)	Период Великих географических открытий, развитие науки и ускорение научно

		технического развития. Период больших социальных потрясений, революций и религиозных войн.
С XVIII-XIX вв.	Начало текущего потепления	

Согласно господствующим в современной палеогеографии представлениям, человеческая цивилизация сформировалась в одну из межледниковых эпох, пик которой, возможно, уже пройден. Это подтверждается исследованиями колебаний глобальной температуры на Земле за последние 10 000 лет по данным анализа керна гренландского льда [7] и изменения температуры в периоды, включающие климатические оптимумы плейстоцена и голоцена [7].

Максимальное развитие последнего континентального покровного оледенения в Северном полушарии, известного в отечественной терминологии как Валдайское (в других регионах мира – Вислинское, Вюрмское, Висконсинское), согласно имеющимся данным палеоклиматических реконструкций, пришёлся на период 24 000 – 18 000 лет назад (л.н.). Средняя температура воздуха в тот период оценивается в величины на 5-60С ниже современных, уровень Мирового океана – на 100-120 метров ниже современного.

Его сменила эпоха деградации ледникового покрова с общей тенденцией к потеплению, на фоне которого имели место многочисленные и местами резкие флюктуации, как температур, так и уровня океана в связи с несколькими стадиями сокращения и возобновления роста ледниковых покровов.

Пик потепления был достигнут в период около 4000 - 6000 л.н. и известен как Климатический оптимум голоцена. Температура в тот период была на 1-30С выше современной, уровень Мирового океана – на 2-4 метра выше. Интересно, что именно к этому периоду относится зарождение древнейших цивилизаций человечества – в бассейнах Нила, Тигра и Евфрата.

Период после голоценового оптимума характеризуется колебаниями температуры с общей тенденцией к снижению. Данный период человеческой истории уже представлен письменными свидетельствами и, в ряде случаев, наблюдаются противоречия между описаниями погодно-климатических условий в них и данными палеогеографических реконструкций.

Наиболее заметный и бесспорный период потепления, хотя и не сравнявшегося с уровнем Климатического оптимума голоцена – Климатический оптимум средневековья около 1000 л.н., в X-XIII вв. нашей эры. Температура Северного полушария была на несколько десятых градуса выше текущей. В историческом плане с этим периодом на Руси связана миграция славян на северо-восток и освоение междуречья Оки и Волги, в Западной Европе – освоение викингами Гренландии и плавание к берегам Северной Америки.

Средневековое потепление сменяется похолоданием с XIII-XIV вв., известного как Малый ледниковый период с температурами примерно на 1 °С ниже современных [8].

С этим периодом, продолжавшимся до XVIII-XIX вв. с максимум похолодания в XVII вв., также связан ряд ключевых событий человеческой истории. С одной стороны, это эпоха Великих географических открытий, развития современной науки и ускорения научного и технологического развития, с другой – период великих социальных потрясений – революций, религиозных войн; на Руси с пиком похолодания совпала также Великая Смута начала XVII века.

Наконец, с XVIII – XIX века, по сути – с начала регулярных и масштабных инструментальных наблюдений за климатом, фиксируется потепление климата.

2 Современные концепции потепления климата

Относительно текущего потепления в научной среде редко встречается две крайние позиции – полное отрицание антропогенной составляющей глобального потепления либо полное отрицание естественных процессов. Другой вопрос – медиа и политики акцентируют внимание именно на «антропогенном потеплении» [9,10].

Доводы сторонников концепции антропогенного потепления основываются, главным образом, на положительной корреляции между потеплением, с одной стороны, и ростом антропогенной эмиссии и содержания в атмосфере CO₂. Потепление идёт на фоне роста антропогенной эмиссии углекислого газа и концентрации парниковых газов, прежде всего, углекислого газа – CO₂, в атмосфере: с 280 ppm (частей на миллион) в конце XIX – начале XX в., и около 310-320 ppm в середине XX века до 410-415 ppm в 2015-2020. Т.е. в 1,5 раза за последние 120 лет и на 30% за последние 60-70 лет [11,12] (рис. 1).

Концепция антропогенного потепления имеет свою историю, и пережила ряд стадий:

- Парниковый эффект обнаружил Жан-Батист Фурье ещё в начале XIX века.
- В конце XIX века Сванте Аррениус предположил, что парниковый эффект может быть связан с двуокисью углерода.
- В 1938 Гай Стюарт Каллендер (Guy Stewart Callendar) на основе имевшихся тогда данных о росте содержания CO₂ в атмосфере и его выбросах при сжигании топлива, предположил, что парниковый эффект и потепление климата может иметь антропогенное происхождение; идея Каллендера не нашла поддержки, тем более, что в 1940-е потепление сменилось похолоданием (1940–1960 гг.), несмотря на продолжавшийся рост эмиссии CO₂.
- В 1970-е гг. эту идею развивал, в том числе, М.И. Будыко [1]. На этот раз идея нашла отклик в связи с возобновлением потепления и рядом других факторов – в т.ч. потому, что она вошла в резонанс с общей обеспокоенностью экологическими проблемами и угрозой дефицита ресурсов («Пределы роста», [13]).

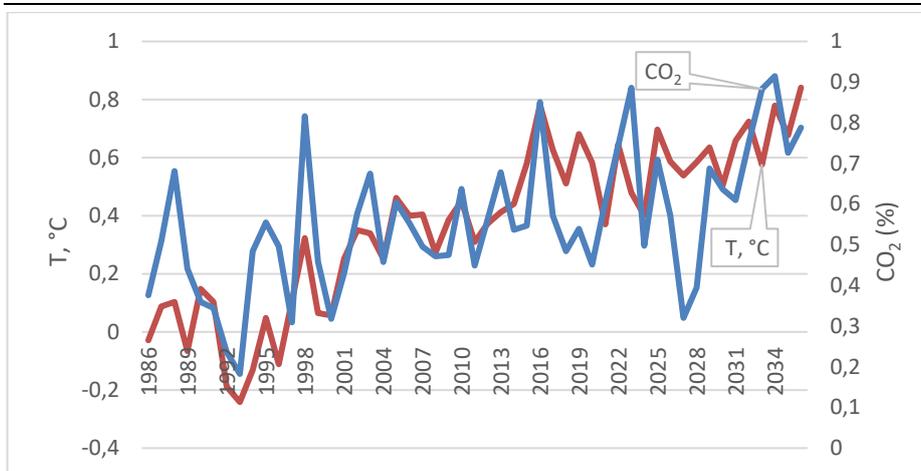


Рис. 2. Нейронный прогноз изменения концентрации CO_2 и аномалий глобальной температуры T за период 1986 -2036 гг. Источник: данные реанализа NCEP/NCAR Reanalysis VI , ClimateReanalyser.org, Climate Change Institute, University of Maine, USA и [12].

В свою очередь, основные контраргументы сторонников концепции преимущественно естественных причин потепления заключаются в следующем:

- На Земле были периоды теплее нынешнего, в том числе в историческом прошлом (голоценовый оптимум, оптимум средневековья), при этом углекислого газа в атмосфере было в 1,5 раза меньше, чем сейчас [14].
- Также был период похолодания 1940– 1960 гг., несмотря на продолжение роста эмиссии парниковых газов. Основным парниковым газом является не углекислый газ, а водяной пар, которого в атмосфере в 5 раз больше (по массе), чем CO_2 . При этом, доля антропогенной эмиссии CO_2 - около 30 млрд тонн в год в настоящее время, составляет менее 1,5% всего содержания CO_2 в атмосфере[15].
- Кроме того, основным резервуаром CO_2 является океан, где его содержится в десятки раз больше, чем в атмосфере. При нагревании океана его способность к растворению CO_2 снижается, соответственно, его содержание в атмосфере растёт. И, если связывать нагревание океана с естественными причинами, то причинно-следственная связь «эмиссия – потепление климата» обратная – именно первичное потепление вызывает рост содержания CO_2 [16].

Кроме того, высказывается скепсис и в отношении корректности наблюдений – в частности, указывается, что значительная часть пунктов наблюдений была создана в загородной местности, а в настоящее время оказалась в пределах городских агломераций и, как следствие, попала под действие тепловых куполов над городами, что искажают реальную картину изменения температур.

Основные концепции естественного потепления связывают его со следующими причинами:

- Изменения климата определяются изменениями параметров орбиты Земли, определяющими изменение инсоляции, которая, в свою очередь, определяет параметры теплообмена между полушариями (развитие идей М. Миланковича рядом исследователей – А.С. Мониным, В.М. Фёдоровым и др. [17,18]);
- Изменения климата могут быть связаны с эндогенными процессами, в частности, циклами водородной и метановой дегазации Земли (В.Л. Сывороткин и др.[19]);
- Чередование похолоданий и потеплений связано с циклами солнечной активности [20].

В данной работе мы обращаем внимание на третью концепцию.

Чередование похолоданий и потеплений обнаруживает определенную корреляцию с циклами солнечной активности начиная с 1880 г. [21]. Однако, начиная с середины 20-го века солнечная активность снизилась, а глобальная температура быстро повысилась [22].

3 Солнечные ритмы и долгосрочные прогнозы изменения климата в Северном полушарии Земли

Для описания климата используют различные статистические характеристики, получаемые в результате математической обработки метеорологических рядов, которые называются климатическими показателями. Все климатические показатели вычисляются по многолетним данным для каждого месяца (сезона) или в целом за год. Основным показателем климата является температура воздуха (или ее аномалии, т.е. отклонения от средней). Для более точного описания климата также используются другие климатические показатели, такие как атмосферное давление, количество осадков, солнечная радиация и другие. Эти показатели могут быть также использованы для исследования связи между климатическими процессами и солнечной активностью.

Нейросетевые модели используются для прогнозирования климатических процессов, таких как температура воздуха и уровень содержания CO_2 в атмосфере. Они могут использоваться для создания прогнозов климатических изменений в будущем, основываясь на предыдущих данных и моделировании различных сценариев.

Для выявления цикличности глобальных климатических процессов и их связи с солнечной активностью (SA) представляется целесообразным исследовать прогнозную динамику (нейронная модель) аномалий температуры воздуха (T_{nh}) в Северном полушарии Земли (рис.2). И затем сопоставить динамику SA и аномалий (T_{nh}), построив частотный спектр аномалий (T_{nh}) температуры (рис.3).

Результаты прогнозирования SA были получены на основе нейросетевой модели, описанной в работе [23].

Частотный спектр аномалий температуры показывает, как часто и с какой интенсивностью происходят изменения температуры. Сравнение частотных спектров SA и аномалий температуры может помочь выявить связь между ними и определить, насколько сильно изменения климата зависят от солнечной активности.

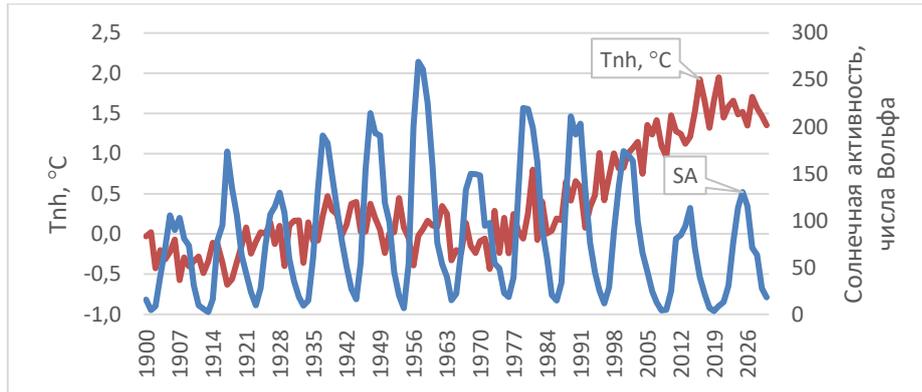


Рис. 2. Нейронный прогноз Аномалий температуры воздуха в Северном полушарии Земли (T_{nh} , °C) и Солнечной активности (SA, числа Вольфа). Источник: нейронный прогноз авторов, [12,23] и данные Royal Observatory of Belgium Av. Circulaire, <https://www.bis.sidc.be/silso/datafiles>

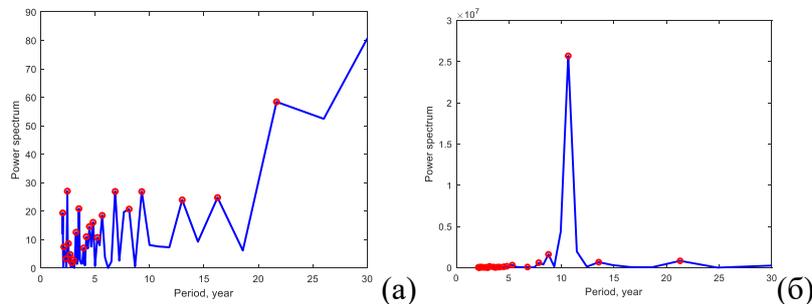


Рис. 3. Частотный спектр (Power spectrum) (а) - аномалий температуры воздуха в Северном полушарии Земли (T_{nh} , °C) и (б) - Солнечной активности (SA, числа Вольфа). Источник: расчеты авторов

Анализ частотного спектра (рис.3) показал ряд общих циклических компонент чисел Wolf и аномалий (T_{nh}) температуры воздуха в Северном полушарии Земли с периодами 21, 13, 10 лет. Наиболее значимая синхронизация по мощности спектра наблюдается для гармонической составляющей T_{nh} с периодом равным 21 лет кратным двойному циклу $SA = 10,5$ лет.

Согласно выполненному нейронному прогнозу и построенному графику сопоставление динамики аномалий (T_{nh}) температуры воздуха в Северном полушарии Земли и хода ее главной циклической гармоники - 21 лет после 2024 года ожидается стабилизация роста аномалий температуры с возможным трендом в

сторону похолодания (рис.4). Этот процесс будет наблюдаться также на фоне снижения уровня SA (рис.2).

Такой прогноз стабилизации роста аномалий температуры воздуха в Северном полушарии Земли с возможным трендом в сторону похолодания после 2024 года основывается на синхронизации гармонической составляющей аномалий (Tnh) температуры воздуха с периодом 21 лет с двойным циклом солнечной активности (SA) и применении нейросетевой модели для прогнозирования SA. Однако, стоит учитывать, что климатические процессы очень сложны и многогранны, поэтому точность любого прогноза может быть ограничена наличием неучтенных факторов и непредсказуемыми изменениями в климатических системах.



Рис. 4. Сопоставление динамики аномалий (Tnh) температуры воздуха в Северном полушарии Земли и хода ее главной циклической гармоники – 21 лет.

На рис.4 мы видим, что в местах пересечения Tnh и ее отдельной компоненты 21 лет подъемы и спады Tnh, в большинстве случаев совпадают с фазой роста, или снижением этой компоненты. Это может свидетельствовать о том, что компонента 21 лет играет важную роль в климатических изменениях и может влиять на общий тренд температуры воздуха. Однако, следует учитывать, что климатические процессы очень сложны и многие факторы, кроме солнечной активности, могут влиять на изменения температуры воздуха. Поэтому, чтобы точно оценить будущую тенденцию изменения климата, необходимо проводить дополнительные исследования и учитывать все возможные факторы влияния.

4 Заключение и выводы

Многолетние изменения солнечной активности могут оказывать значительное влияние на климатические процессы на Земле. Результаты исследований показывают, что существует синхронизация между колебаниями солнечной активности и климатическими процессами на Земле, включая температурные аномалии в Северном полушарии.

Проведенный анализ частотного спектра метеорологических данных показал наличие общих циклических компонент чисел Вольфа и аномалий температуры воздуха с периодами 21, 13, 10 лет. Важной является гармоническая составляющая аномалий температуры воздуха с периодом 21 лет, которая имеет синхронизацию с двойным циклом солнечной активности, равным 10,5 лет.

Нейронные прогнозы на основе моделей метеорологических данных и солнечной активности показывают, что после 2024 года ожидается стабилизация роста аномалий температуры воздуха в Северном полушарии Земли, с возможным трендом в сторону похолодания на фоне снижения уровня солнечной активности.

Таким образом, связь между многолетними изменениями солнечной активности и климатическими процессами на Земле представляет собой сложный механизм взаимодействия, требующий дальнейших исследований. Полученные результаты исследования показывают, что учет солнечной активности является важным фактором для прогнозирования климатических изменений на Земле.

Поскольку климатические процессы являются очень сложными и многовариантными, и не все факторы, влияющие на климат, могут быть учтены в данном анализе. Поэтому прогнозы климатических изменений в большинстве случаев могут быть сопряжены с высокой степенью неопределенности.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № FMWE-2024-0017)

Литература

1. Будыко М.И. Глобальное потепление и его последствия // Избранные работы. Санкт-Петербург: ООО «Америт»: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 2020. Р. 206.
2. Мони́н А.С., Сеидов Д.Г. Погода и климат океана // Природа. 1983. № 1. Р. 34–43.
3. Израэль Ю.А. et al. Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: вклад рабочей группы II // Метеорология и гидрология. Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт гидрометеорологической службы Российской Федерации, 2007. № 9. Р. 5–13.
4. Котляков В.М. История климата Земли по данным глубокого бурения в Антарктиде // Природа. Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-исследовательский институт географии и геоэкологии РАН, 2012. № 5. Р. 3–9.
5. Дегтярев К.С., Показеев К.В., Соловьев Д.А. Синхронизация ритмов Солнца с параметрами климатической системы Северного полушария Земли // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Восьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Материалы конференции. Москва: ИПМех РАН, 2022. Р. 81–84.
6. Дегтярев К.С. Изменения климата - введение в проблематику // Причины изменений климата и вес антропогенной составляющей: модели и результаты. Оценки роли парниковых газов в изменениях климата. Москва, 2021.

7. Alley R.B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland // *Quat. Sci. Rev.* 2000. Vol. 19, № 1-5. P. 213–226.
8. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Об изменениях температуры воздуха северного полушария за последние 2000 лет // *Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). Общество с ограниченной ответственностью Центр научно-информационных...*, 2015. № 4 (37). P. 161–170.
9. Показеев К.В., Соловьев Д.А. «ПРЕОДОЛЕВАЯ ПРЕДЕЛЬ» – НОВЫЙ ПРОЕКТ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА // *Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Восьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Материалы конференции. Москва: ИПМех РАН, 2022. P. 141–144.*
10. Показеев К.В., Соловьев Д.А. О докладе «Преодолевающая пределю» // *Процессы в геосредах.* 2022. № 2(32). P. 1573–1579.
11. Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // *Вестник РАН.* 2008. Vol. 78, № 1. P. 20–27.
12. Бушуев В.В., Клепач А.Н., Соловьев Д.А. Образ переходного мира: экономика, энергетическое развитие и природные аномалии // *Энергетическая политика.* 2022. № 3. P. 14–27.
13. Meadows D.H. et al. *The limits to growth-club of rome.* Club of Rome, 1972.
14. Бондаренко Л.В. et al. Глобальное изменение климата и его последствия // *Вестник Российского экономического университета им. ГВ Плеханова. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего...*, 2018. № 2 (98).
15. Алексеев С.В. Изменение климата и энергетика // *Углекислотная и экология Кузбасса. Сборник тезисов докладов XI Международного Российско- Казахстанского Симпозиума. Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. P. 16–16.*
16. Вакуленко Н.В., Нигматулин Р.И., Сонечкин Д.М. К вопросу о глобальном изменении климата // *Метеорология и гидрология. Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский...*, 2015. № 9. P. 89–97.
17. Федоров В.М. *Солнечная радиация и климат Земли.* Москва: ООО Издательская фирма “Физико-математическая литература,” 2018. 232 p.
18. Мониин А.С. *Вращение Земли и климат.* Гидрометеиздат, 1972. 112 p.
19. Сывороткин В.Л. Климатические изменения, аномальная погода и глубинная дегазация // *Пространство и Время. Автономная некоммерческая организация Научно-издательский Центр...*, 2010. № 1. P. 145–154.
20. Башкирцев В.С., Машнич Г.П. Солнечная активность и изменения климата Земли // *Солнечно-земная физика. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно...*, 2005. № 8. P. 179–181.
21. Lindsey R. *Climate Change: Incoming Sunlight* [Electronic resource] // www.climate.gov. 2009. URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight>.
22. Lindsey R. *Climate Change: Incoming Sunlight* [Electronic resource] // www.climate.gov. 2009.
23. Бушуев В.В. et al. Анализ и прогноз цикличности социо - природных явлений первой половины 21-го века // *Окружающая среда и энергосодержание.* 2020. № 4(8). P. 36–44.

References

1. Budyko M.I. Globalnoe poteplenie i ego posledstviya Izbrannye raboty. Sankt-Peterburg OOO «Amerit» Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A. I. Voejkova 2020. P. 206.
2. Monin A.S. Seidov D.G. Pogoda i klimat okeana Priroda. 1983. 1. P. 34–43.
3. Izrael Yu.A. et al. Chetvertyj ocenochnyj doklad Mezhravitelstvennoj gruppy eks-pertov po izmeneniyu klimata vklad rabochej gruppy II Meteorologiya i gidrologiya. Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie Nauchno-issledovatel'skij... 2007. 9. P. 5–13.
4. Kotlyakov V.M. Istoriya klimata Zemli po dannym glubokogo bureniya v Antarktide Priroda. Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie Akademicheskij nauchno-issledovatel'skij... 2012. 5. P. 3–9.
5. Degtyarev K.S. Pokazeev K.V. Solovov D.A. Sinxronizatsiya ritmov Solnca s para-metrami klimaticheskoj sistemy Severnogo polushariya Zemli Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie processov v geosredax Vosmaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya-shkola molodyx uchenyx 12-14 oktyabrya 2022 g. Moskva Materialy konferencii. Moskva IPMex RAN 2022. P. 81–84.
6. Degtyarev K.S. Izmeneniya klimata - vvedenie v problematiku Prichiny izmenenij klimata i ves antropogennoj sostavlyayushhej modeli i rezultaty. Ocenki roli par-nikovyx gazov v izmeneniyax klimata. Moskva 2021.
7. Alley R.B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland Quat. Sci. Rev. 2000. Vol. 19 1-5. P. 213–226.
8. Vajnovskij P.A. Malinin V.N. Ob izmeneniyax temperatury vozduxa severnogo polushariya za poslednie 2000 let Obshhestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana). Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu guillemotleftCentr nauchno-informacionnyx... 2015. 4 (37). P. 161–170.
9. Pokazeev K.V. Solovov D.A. «PREODOLEVAYa PREDELY"» – NOVY"J PROEKT RESHENIYa GLOBALNY"X PROBLEM CHELOVECHESTVA Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie processov v geosredax Vosmaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya-shkola molodyx uchenyx 12-14 oktyabrya 2022 g. Moskva Materialy konferencii. Moskva IPMex RAN 2022. P. 141–144.
10. Pokazeev K.V. Solovov D.A. O doklade «Preodolevaya predely» Processy v geo-sredax. 2022. 2(32). P. 1573–1579.
11. Gulev S.K. Katcov V.M. Solomina O.N. Globalnoe poteplenie prodolzhaetsya Vestnik RAN. 2008. Vol. 78 1. P. 20–27.
12. Bushuev V.V. Klepach A.N. Solovov D.A. Obraz perexodnogo mira ekonomika energeticheskoe razvitie i prirodnye anomalii Energeticheskaya politika. 2022. 3. P. 14–27.
13. Meadows D.H. et al. The limits to growth-club of rome. Club of Rome 1972.
14. Bondarenko L.V. et al. Globalnoe izmenenie klimata i ego posledstviya Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta im. GV Plexanova. Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshhego... 2018. 2 (98).
15. Alekseenko S.V. Izmenenie klimata i energetika Ugleximiya i ekologiya Kuzbassa. Sbornik tezisov dokladov XI Mezhdunarodnogo Rossijsko- Kazaxstanskogo Simpoziuma. Kemerovo Federalnyj issledovatel'skij centr uglya i ugleximii Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk 2022. P. 16–16.
16. Vakulenko N.V. Nigmatulin R.I. Sonechkin D.M. K voprosu o globalnom izmenenii klimata Meteorologiya i gidrologiya. Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie Nauchno-issledovatel'skij... 2015. 9. P. 89–97.

17. Fedorov V.M. Solnechnaya radiaciya i klimat Zemli. Moskva OOO Izdatelskaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura" 2018. 232 p.
18. Monin A.S. Vrashhenie Zemli i klimat. Gidrometeoizdat 1972. 112 p.
19. Syvorotkin V.L. Klimaticheskie izmeneniya anomalnaya pogoda i glubinnaya degaza-ciya Prostranstvo i Vremya. Avtonomnaya nekommercheskaya organizaciya Nauchno-izdatelskij Centr~... 2010. 1. P. 145–154.
20. Bashkircev V.S. Mashnich G.P. Solnechnaya aktivnost i izmeneniya klimata Zemli Solnechno-zemnaya fizika. Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut solnechno~... 2005. 8. P. 179–181.
21. Lindsey R. Climate Change Incoming Sunlight Electronic resource www.climate.gov. 2009. URL <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight>.
22. Lindsey R. Climate Change Incoming Sunlight Electronic resource www.climate.gov. 2009.
23. Bushuev V.V. et al. Analiz i prognoz ciklichnosti socio - prirodnyx yavlenij pervoj poloviny 21-go veka Okruzhayushhaya sreda i energovedenie. 2020. 4(8). P. 36–44.

The Impact of Solar Activity on Long-Term Climate Changes in the Northern Hemisphere

^{1,1}Degtyarev Kirill, ^{1,2}Pokazeev Konstantin, ^{2,3}Solovyev Dmitry

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: ¹kir1111@rambler.ru, ²sea@phys.msu.ru,
³solovev@ocean.ru

Abstract. The article provides an overview of various concepts explaining climate change in the past and present. A retrospective analysis is used to analyse past climate events. Statistical climate indicators obtained as a result of mathematical processing of meteorological series, in particular, anomalies of air temperature in the Northern Hemisphere and the level of CO₂ in the atmosphere, are investigated. The course of the main cyclic components of the multi-year changes in solar activity and temperature anomalies in the Northern Hemisphere over the period 1900-2030 was also analysed. The comparison showed that synchronization between them is observed for the components of fluctuations with a period of about 21 years. Based on this, neural predictions of the dynamics of temperature anomalies in the Northern Hemisphere were obtained. According to the forecasts received, the growth of temperature anomalies is expected to stabilize after 2024, with a possible trend towards cooling amid a decrease in the level of solar activity.

Keywords: Earth's climate, global warming, solar activity, neural forecasting, air temperature anomalies

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FMWE-2024-0017).

УДК 330.34:332.145

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-25-36

EDN: GMSWZI

Сравнение программ низкоуглеродного развития России и Китая

Садртинов Кирилл Денисович ^[0009-0008-7585-2845]

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

E-mail: sadrtinov.kirill@yandex.ru

Аннотация. В статье раскрываются и сравниваются экологические аспекты программ низкоуглеродного развития России и Китая. Отличительной особенностью государств является продолжение наращивания объемов выбросов CO₂ с постепенным выходом на плато в 2030 г. и достижение углеродной нейтральности в 2060 г. Перспективным направлением в декарбонизации экономики становится развитие технологий улавливания, поглощения и консервации углерода. К 2050 г. предполагается трансформация энергосистем в России за счет преобладания потребления ядерной энергии - 33%, и энергетическая революция в Китае за счет увеличения доли потребления энергии на ВИЭ до 58%. Китайская программа низкоуглеродного развития объемнее и амбициознее российской, что подтверждается всесторонней государственной поддержкой, максимальным инвестированием в низкоуглеродные технологии через сложившуюся систему зеленого кредитования. В Китае развит углеродный рынок, что позволяет эффективно реализовывать климатические проекты, что не характерно для России.

Ключевые слова: декарбонизация, углеродная нейтральность, низкоуглеродные технологии, углеродный рынок, климатические проекты, возобновляемая и ядерная энергетика

1 Введение

Обостряющаяся в нынешнем столетии глобальная проблема изменения климата, согласно различным гипотезам, вследствие антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ), заставляет человечество переориентироваться на низкоуглеродное развитие, в первую очередь, связанное с декарбонизацией экономики, т.е. отказом от использования углеводородного (ископаемого) топлива в пользу во-

возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что в конечном счете позволит достичь углеродной нейтральности (нулевых выбросов ПГ). Китай и Россия входят в пятерку стран-эмитентов CO₂, и в совокупности дают примерно треть мировых выбросов, причем 29% Китай и только около 5% Россия, что делает эти страны значимыми на международной арене игроками в переходе на низкоуглеродную экономику. Оба государства ратифицировали Парижское соглашение, Китай в 2016 г. и Россия в 2019 г., значит, обязуются сдерживать рост средней глобальной температуры намного ниже 2° С и приложить усилия для ограничения роста температуры величиной 1.5°С [14], что делает важным сокращение выбросов ПГ в ключевых отраслях экономики и служит стимулом внедрения низкоуглеродных технологий, особенно в энергетическом секторе. Однако внутренняя политика позволяет странам определять собственные приоритеты низкоуглеродного развития. Так, Россия и Китай поставили цель достичь углеродную нейтральность в 2060 г., но при этом ни одна из стран не уточняет и не конкретизирует шаги и этапы реализации такой долгосрочной цели, и до конца остается неясным, что вкладывают в это понятие. Вероятно, китайская углеродная нейтральность связана, прежде всего, с прекращением использования угля, обеспечивающего сегодня энергетическую безопасность первой экономики мира, в пользу газификации, наращиванию генерации на ВИЭ и др. новых источников энергии, что отличается от классических западноевропейских представлений углеродно-нейтральной экономики, основанной исключительно на безуглеродных источниках. Российская углеродная нейтральность в принципе не подразумевает отказ от использования углеводородов, и баланс выбросов ПГ будет компенсирован их поглощением экосистемами.

При переходе к низкоуглеродному развитию страны придерживаются собственных разработанных и утвержденных планов, стратегий, проектов в этой области. В существующих научных оценках и обзорах данных документов ни по России [2,8], ни по Китаю [3–6, 10] практически не затрагиваются экологические стороны стратегии низкоуглеродного развития, имеющих огромное значение в реализации климатических обязательств странами.

Цель работы – анализ и сопоставление программ низкоуглеродного развития России и Китая на наличие и раскрытие экологических аспектов. В работе решались следующие **задачи**: 1) изучение нормативно-правовой базы низкоуглеродного развития и ее целевых показателей в России и Китае; 2) рассмотрение и сопоставление основных экологических инструментов и путей (приоритетов) низкоуглеродного развития; 3) анализ роли ВИЭ, ядерной и водородной энергетики в декарбонизации экономики стран.

Источники информации, используемые в работе: официальные стратегические документы и проекты, принятые в странах, в области низкоуглеродного развития и сокращения выбросов ПГ, аналитические отчеты, обзорные тематические статьи и открытые статистические материалы.

2 Нормативно-правовые акты и целевые показатели программ низкоуглеродного развития России и Китая

В Китае главным ориентиром низкоуглеродного развития служит концепция «экологической цивилизации», прописанной в уставе КПК. В 2021 г. утверждена национальная «Программа действий по сокращению выбросов углерода к 2030 г.», которую дополняет принятый 4 августа 2023 г. «План реализации демонстрационных проектов «зеленых» и низкоуглеродных передовых технологий» [15].

В России действует № 296-ФЗ "Об ограничении выбросов парниковых газов" от 02 июля 2021 г. и «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» от 29 октября 2021 г [9, 11].

Для оценки как экономического развития, так и экологической ситуации стран, принято использовать показатели: суммарные объемы выбросов CO₂, нетто-выбросы CO₂, удельные выбросы CO₂, углеродоемкость ВВП, доля неископаемых (безуглеродных) источников в производстве и потреблении энергии, объемы поглощения CO₂ поглотительными (управляемыми) экосистемами, лесистость, запасы лесного фонда и т.д. В табл. 1 приведены актуальные значения целевых (экологических) показателей на базовый год (момент составления программ низкоуглеродного развития), а также прогнозируемые на 2030 и 2050 гг., к которым страны стремятся.

Таблица 1. Целевые показатели низкоуглеродного развития. Составлено автором по данным [2, 7, 9, 10, 12]

Целевой показатель	Россия			Китай		
	2019	2030	2050	2020	2030	2050
Объемы выбросы CO ₂ , млн тонн экв.CO ₂ /год	2119	2253	2521	13100	-	-
Нетто-выбросы CO ₂ , млн тонн экв.CO ₂ /год	1584	1673	630	-	-	-
Объемы поглощения CO ₂ , млн тонн экв.CO ₂ /год	535	539	1200	-	-	-
Выбросы CO ₂ на ед. ВВП (углеродоемкость), тыс. тонн CO ₂ /млрд. долл.	0.46	0.4	0.2	0.69	0.38	0.22
Доля потребления не-ископаемой энергии, %	36	42	67	15	25	65
Лесистость, %	47	-	-	23.4	25	-

В целом довольно затруднительно проводить сравнение России и Китая в виду неполноты данных и не установленных даже базовых показателей по выбросам ПГ Китая. Тем не менее, обе страны стремятся достичь пика выбросов в 2030 г. и нулевых выбросов в 2060 г. Интересно, что Россия будет ограничивать выбросы на уровне не более 70% от уровня 1990 г. [8, 9], значит не должны превышать 2162,4 млн тонн CO₂-эквивалента. Соответственно, Россия может даже продолжать увеличивать совокупные выбросы и при этом не выходить за рамки целевого показателя. Тогда как Китай вообще не устанавливает конкретные значения выбросов, констатируя только, что будет наращивать выбросы и постепенно выходить на плато к 2030 г., а затем снижать их, при этом не регламентируя свой уровень воздействия. Однако Китай ставит цель снижение углеродоемкости к 2030 г. более чем на 65% относительно уровня 2005 г. Углеродоемкость российской экономики к 2030 г. должна снизиться на 10%, и на половину к 2050 г. относительно 2019 г. В целом в России реально сократить выбросы CO₂ получится в топливно-энергетическом и металлургическом секторах, в других отраслях прогнозируется абсолютный рост выбросов, наиболее интенсивный в химической промышленности и транспорте, но удельные выбросы сократятся во всех секторах.

Таким образом, при построении низкоуглеродной модели экономики, и в России, и в Китае на данный момент имеет место только стабилизация выбросов или даже наращивание с совершенствованием технологии улавливания, консервации и поглощения углерода, особенно в России. Если Китай не предоставляет данных о поглотительной способности своих экосистем, то Россия, напротив, предлагает увеличить его более чем в два раза. Однако, как указано в [8], Россия при учете поглотительного потенциала включала и неуправляемые экосистемы, что противоречит методологии РКИК ООН 2021, и вызывает вопросы в достоверности выявленного потенциала поглощения 535 млн тонн экв. CO₂/год. Также остается неясным и не раскрытым в стратегии [9] за счет каких лесов предусматривается наращивание объемов поглощения до 1200 млн тонн экв. CO₂/год, учитывая их разновозрастность, контрастность лесорастительных условий, высокую пожароопасность и т.д. К тому же большие площади занимают малонарушенные старовозрастные лесные территории Сибири и Дальнего Востока, у которых, наоборот, невысокая поглотительная способность, и в перспективе их потенциал углеродного регулирования будет снижаться в силу увеличения возраста лесных массивов, что вызывает еще больше сомнений в эффективности реализации такой практики в лесном хозяйстве. Поэтому необходим пересмотр практики ведения лесопользования, в первую очередь в борьбе с лесными пожарами и контролем незаконных рубок. Уровень лесистости нашей страны относительно стабилен в последние годы, около 47% , однако в стратегических документах данный показатель никак не упоминается, чего нельзя сказать про Китай, в котором уделяется отдельное внимание увеличению лесопокрытой площади с 23.4% до 25%, преимущественно за счет естественного лесовосстановления нарушенных земель и реализации программ по озеленению населенных пунктов, что косвенно позволяет судить о наращивании в будущем потенциала поглощения углерода молодыми лесами.

3 Основные механизмы и направления реализации программ низкоуглеродного развития

Реализация стратегии Россией предполагается осуществлять по интенсивному сценарию [9]. Сформулированы общеотраслевые и специальные меры (по секторам экономики). Общеотраслевые механизмы нацелены на корректировку финансовой, налоговой и таможенной политики с учетом вызовов развития с низким уровнем выбросов парниковых газов; принятие государственных программ под адаптацию к климатическим изменениям; создание национальной системы содействия сокращению выбросов парниковых газов и поддержки устойчивого развития; поддержку зеленого финансирования (различных систем финансовых вложений, например: зеленые облигации, зеленые кредиты, для реализации зеленых проектов и продвижения низкоуглеродных технологий). Особое внимание уделяется наилучшим доступным технологиям (НДТ), повышению энергоэффективности и ресурсоемкости, и, соответственно, стимулированию вторичного использования энергоресурсов, продвижению безуглеродных и малоуглеродных технологий, в т.ч. поддержка и распространение технологий улавливания, захоронения и дальнейшего использования парниковых газов. Значимая роль отводится климатическим проектам и добровольному углеродному рынку, как наиболее оптимальному и компромиссному подходу для государства, бизнеса и общественности [8]. В сентябре 2022 г. вступили в силу нормативно-правовые акты, регулирующие порядок реализации в России климатических проектов и выпуск в обращение углеродных единиц. К климатическим относятся проекты по лесовосстановлению, в области возобновляемой энергетики, эффективного обращения с отходами, устойчивого сельского хозяйства. Наибольшее предпочтение отводится лесоклиматическим проектам из-за кажущейся их простоты, однако они требуют постоянных инвестиций, обширных междисциплинарных знаний в лесном деле и имеют большие риски из-за сложности прогнозирования и контроля пожаров, инфекций и иных факторов, приводящих к гибели древесных форм. На данный момент зарегистрированные в реестре углеродных единиц климатические проекты в большей степени отведены под технологические новации и развитие менее углеродоемких установок и модернизацию устаревшего оборудования, и только один из них направлен на лесовосстановление на Сахалине, предполагающее на заболоченных землях с последующей противопожарной защитой посадку 6 тыс. га лиственничного леса к 2028 г. За весь период они нейтрализуют 1,5 млн тонн выбросов CO₂. Благодаря данному проекту Сахалинская область собирается достичь углеродной нейтральности до конца 2025 г. В случае успешного завершения эксперимента, подобные проекты планируют реализовывать и в других субъектах РФ, что должно содействовать в достижении углеродной нейтральности всей России.

Другие немаловажные специальные механизмы низкоуглеродного развития в России: в транспорте – трансформация грузо- и пассажирооборота на менее углеродоемкие виды транспорта; масштабная электрификация в первую очередь общественного транспорта, расширение использования гибридных форм топлива для автомобилей и строительство сопутствующей (газомоторной и электротяговой) инфраструктуры и обеспечение к ней доступа. В строительстве и ЖКХ – повышение энергоэффективности зданий, в т.ч. за счет ВИЭ. В сельском хозяйстве сделан акцент на точное земледелие, борьбе с эрозией, применение прогрессивных агрономических методов (регенеративных технологий), повышающих урожайность и способствующих более интенсивному поглощению остаточного углерода, развитие биогазовых комплексов, получающих биотопливо из отходов животноводства и растениеводства, обводнение ранее осушенных болот и регулирование водного баланса, что предотвратит пожары. Промышленный сектор должен базироваться на принципах экономики замкнутого цикла, снижающих объемы отходов и утечек, что уменьшает выбросы ПГ. Предлагаются технологические новации во всех обрабатывающих отраслях, что повысит экологичность продукции, отдельно подчеркиваются такие направления как: использование новых энергоносителей, включая водород и биодизель, распространение технологий сбора свалочного газа и его использование в качестве топлива, максимальная переработка органических отходов в компост и биогаз, создание системы утилизации отработанного энергетического оборудования и возврат в экономический цикл цветных и черных металлов, что снижает потребность в первичных металлах, и, соответственно, уменьшает энергозатраты. Итак, несмотря на широкий спектр и разнонаправленность планируемого внедрения низкоуглеродных технологий, в стратегии не оцениваются их эффективность для выполнения целевых показателей, и возможности масштабов их применения в отраслях экономики.

Реализация стратегии Китая предполагает более масштабную реорганизацию экономики, по сравнению с Россией. Аналогично в Китае продвигают безуглеродные источники энергии, экологизацию транспорта, экономику замкнутого цикла, повышение энергоэффективности зданий и внедрение стандартов зеленого строительства, развитие технологий консервации углерода в сельском хозяйстве. Также взят курс на повышение экологического просвещения и образования населения, совершенствуются инновационные механизмы, реализуются пилотные проекты по достижению пика выбросов ПГ и начинается развитие технологии CCUS. В декабре 2022 г. первый «проект технологии CCUS для использования минерализации химической цепи углекислого газа на тепловых электростанциях» успешно прошел 168-часовой испытательный запуск в государственной энергетической группе Guodian Electric Power Datong Company [1]. У России отсутствует похожий успешный опыт применения таких технологий.

В Китае планируется закрытие грязных предприятий, внедрение политики «углеродного пика» в нефтехимической и химической промышленности и ограничение поддержки проектов с высоким углеродным следом, предъявляются самые жесткие стандарты к строящимся угольным станциям [5]. В Китае осуществляются пилотные проекты по формированию систем торговли выбросами парнико-

вых газов в 8 провинциях при диапазоне цены от \$1 за 1 т CO₂-эквивалента (провинция Фуцзянь) до \$12 за 1 т CO₂-эквивалента в Пекине, в одном из самых углеродоемких городов страны [3]. В отличие от России, в Китае развит крупнейший в мире углеродный рынок. Это торговая система выбросов CO₂ китайскими предприятиями (ETS) в формате рынка, где участники могут продавать и покупать кредиты на выбросы углерода.

Еще один важный ключевой механизм – зеленое финансирование проектов низкоуглеродного развития. В России стало активно поддерживаться зеленое финансирование с 2021 г. Были сформулированы конкретные требования к зеленым проектам, основными из них являются соответствие целям Парижского соглашения или устойчивого развития, технологическим показателям НДТ, обеспечение сокращения выбросов ПГ, сохранение окружающей среды и т.д. [8]. В основном эти проекты реализуются по таким направлениям, как возобновляемая энергетика, управление отходами, транспорт, сельское хозяйство, водоотведение. В Китае развитие зеленых проектов началось примерно на 5 лет раньше, чем в России [6]. «Руководство по созданию зеленой финансовой системы» Китая содержит ряд решений природоохранной направленности и предусматривает более широкий спектр системы зеленого финансирования: зеленые облигации, зеленое кредитование, страхование, рынок квот на выбросы загрязняющих веществ и др. Конечная цель зеленых финансов в Китае обеспечить максимальное продвижение сведения выбросов парниковых газов до нулевого уровня. Основные сферы, затронутые системой зеленого финансирования в Китае – возобновляемая энергетика, чистый транспорт, водоочистные сооружения и переработка продукции. И в отличие от России, в Китае заметную роль играют зеленые облигации, треть которых направлено на развитие низкоуглеродного транспорта и почти столько же на строительство СЭС в 2018 г. Дополнительно стоит подчеркнуть, что в 2023 г. в Китае обновлены сертификаты зеленой электроэнергии, в которые включили все существующие виды возобновляемых источников энергии, а не только энергию Солнца и ветра, как было ранее.

Среди всех финансовых инструментов в Китае по-прежнему преобладают зеленые кредиты, осуществляющие под залог выдачу прав на выбросы углеродных единиц и крупнейшая в мире система торговли выбросами (СТВ), запущенная в 2021 г. и охватывающая 2225 газовых и угольных электростанций с выбросами более 26 тыс. тонн CO₂-экв. в любой год на временном периоде 2013-2019 гг., покрывая тем самым 40% всех выбросов страны (ок. 4 млрд тонн CO₂) [10]. В мае 2021 г. Китай опубликовал политику углеродной нейтральности «1 + N», где «1» означает общее руководство, а «N» относится к операционной политике ключевых ведомств. Фокус политики направлен на преобразование энергетической структуры, повышение энергоэффективности и технологические инновации в зеленой энергетике.

4 Энергетическая трансформация при переходе на низкоуглеродное развитие

Центральное место в низкоуглеродной экономике и трансформации энергосистем занимают возобновляемые источники энергии, которые не дают выбросов ПГ в фазе производства электроэнергии, чего и требуют условия Парижского соглашения. Стоит подчеркнуть, что состояние на 2019 г. возобновляемой энергетики Китая и России существенно различается. В энергобалансе России преобладают более чем в 2 раза неископаемых источников по сравнению с Китаем достигается за счет пятой части доли атомной энергии и почти 15% гидроэнергии, тогда как нетрадиционные ВИЭ (энергия Солнца, ветра и др.) занимают менее 1%. В Китае, напротив, в предыдущем десятилетии большие инвестиции в зеленые проекты – 27% средств финансируемых за счет зеленых облигаций направлены в сектор ВИЭ в 2019 г. поспособствовали значительному приросту мощностей ВИЭ [6], их доля в энергобалансе страны выше других неископаемых источников и достигает 8.5%, причем 5.5% за счет энергии ветра, 3% - энергия Солнца, тогда как доля атомной энергии всего 4.8% [3]. Сегодня Китай мировой лидер по производству водорода, преимущественно коричневого и серого, в суммарном объеме около 33 млн тонн.

В дальнейшей перспективе низкоуглеродного развития России делается упор на продолжение развития атомной энергетики, тогда как ВИЭ по-прежнему будут играть второстепенную роль на локализованных труднодоступных территориях, изолированных от единой энергосистемы (Крайний Север, Дальний Восток). В настоящее время строится 3 атомных реактора с установленной мощностью в стадии строительства 2810 МВт [4]. Планируется повысить долю выработки электроэнергии на АЭС до 33% к 2050 г., доля ВИЭ к 2030 г. вырастет в 2 раза, в основном за счет ВЭС (1.4%), к 2050 г. в 17 раз, за счет ВЭС (10.6%) и СЭС (6.7%) [2]. Также перспективной отраслью для России может стать водородная энергетика, в 2021 г. утверждена соответствующая концепция водородной энергетики. В нашей стране только начинает развиваться инфраструктура для производства водорода, наиболее важно серийное производство электролизеров и их локализация. Россия производит водород не на основе ВИЭ (зеленый водород), а в основном из газа (голубой водород) и угля (коричневый водород). Сейчас Росатом реализует проект получения водорода с использованием энергии атомных станций, и к 2033 г. планируется запустить АЭС по производству водорода. К 2050 г. совокупное производство водорода должно составить 974 тыс. тонн.

Китайская перспектива низкоуглеродного развития предполагает более масштабную реструктуризацию электроэнергетики, энергетическую революцию перехода к экологической цивилизации: увеличение производства и использование водорода более чем в три раза, причем стимулируется производство зеленого водорода; интенсификация развития биоэнергетики [6]; развитие атомной энергетики; в настоящее время строится 22 атомных реактора с установленной мощно-

стью в стадии строительства 24781 МВт [4]. Основные направления развития возобновляемой энергетики были окончательно сформулированы в 2021 г. в «Программе действий по сокращению выбросов углерода к 2030 г.», подразумевающей увеличение доли неископаемых источников в общем потреблении энергии до 25%; в т.ч. установление мощностей более 1200 ГВт в ветровой и солнечной энергетике – на конец 2023 г. мощность СЭС и ВЭС по данным IRENA уже достигла 1013 ГВт [13]; увеличение установленных мощностей в гидроэнергетике на 40 ГВт; и обеспечение покрытия минимум половины крыш новых общественных и фабричных зданий солнечными батареями. По оценкам Национального центра возобновляемой энергетики CNREC [12], к 2050 г. доля неископаемых источников энергии в общем предложении первичной энергии будет составлять 65%, из них на ВИЭ придется 58%, а в 2060 г. доля неископаемых источников вырастет до 80%, из них на ВИЭ придется 60%. Пятую часть энергопотребления должно обеспечиваться водородом, что сыграет значительную роль в завершении угольной эры. Потребление угля сократится с современных 57% до 11%.

5 Заключение

На основе изученных программ низкоуглеродного развития России и Китая можно сделать следующие **выводы**:

1. Китай и Россия планируют в 2060 г. достичь углеродную нейтральность, однако отсутствует единый подход в стратегии низкоуглеродного развития, т.к. Китай не формулирует целевые показатели сокращения выбросов ПГ, а Россия собирается их наращивать, компенсируя увеличением объемов поглощения экосистемами до 1200 млн тонн CO₂-эквивалента в год.

2. В китайской и российской программах низкоуглеродного развития имеют место схожие направления экономических преобразований, связанных с совершенствованием технологий улавливания и консервации углерода, экологизацией транспорта, продвижением малоотходных и безуглеродных технологий, повышением энергоэффективности, внедрением практики зеленого строительства.

3. Китай, в отличие от России, эффективнее продвинулся в зеленом финансировании проектов низкоуглеродного развития. Китай смог развить крупнейшую в мире систему торговли выбросами и углеродный рынок. Тогда как в России такие инструменты являются необязательными и скорее всего не получают широкого распространения в дальнейшем.

4. Энергетическая трансформация Китая выглядит гораздо масштабнее российской, что связано с планами по сведению к минимуму потребления угля в пользу возобновляемых источников энергии, основного источника энергопотребления будущей китайской экологической цивилизации. В России возобновляемая энергетика будет развиваться локально, в труднодоступных районах, предпочтение отдается атомной и водородной энергетике.

5. Китай ставит более амбициозные задачи в достижении углеродной нейтральности в короткие сроки, что должно завершить эру угля и позволить перейти на чистые источники энергии, тогда как Россия останется нефтегазовой

державой, подразумевая под низкоуглеродной моделью экономики в большей степени преодоление технологических барьеров и зависимости различных отраслей, экономических вызовов с соблюдением экологических ограничений и требований.

Главное упущение стратегического планирования заключается в поверхностном рассмотрении экологических и географических аспектов низкоуглеродного развития. Программы, составленные на такие огромные страны, никак не учитывают сложившуюся территориальную дифференциацию, региональные различия существующих современных социально-экономических, экологических и особенно климатических вызовов. Следовательно, дальнейший успех в достижении поставленных задач низкоуглеродного развития зависит от того, насколько регионы смогут адаптироваться под данную программу, слаженно и грамотно согласовать проекты на местном уровне с учетом своих ресурсных, трудовых, экономических, технологических, экологических и других возможностей и ограничений. Не менее важным становится и межгосударственное сотрудничество, в т.ч. трансграничные проекты низкоуглеродного развития, особенно в контексте взаимоотношений России и Китая, что требует отдельных исследований.

Литература

1. Амурская М.А. Концепция низкоуглеродной экономики и опыт Китая // Экономические науки. 2023. №1 (218). С. 142–147
2. Башмаков И.А. Низкоуглеродные технологии в России: Нынешний статус и перспективы. URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/Tehnologicheskij_razryv_1c905a5aa1.pdf, reference date: 10.07.2024.
3. Бобылев С.Н., Барабошкина А.В., Джу Сюан. Приоритеты низкоуглеродного развития для Китая. Государственное управление. Электронный вестник. Выпуск № 82, 2020. С. 114–139
4. Евченко Н.Н., Ван Сяохань. Перспективы углеродной нейтральности экономики Китая: технологические инновации и межгосударственные проекты // Проблемы прогнозирования. 2024. № 3 (204). С. 182–198.
5. Кранина Е. И. Китай на пути к достижению углеродной нейтральности // Финансовый журнал. 2021. Т. 13. № 5. С. 51–61.
6. Макеев Ю.А., Салицкий А.И., Семенова Н.К. Декарбонизация в Китае: проблемы осуществления энергоперехода и финансирования // Восток (Oriens). 2022. № 1. С. 89–105.
7. Охрана окружающей среды в России. 2020: Стат. сб./Росстат. – 0-92 М., 2020. – 113с.
8. Попова И.М., Колмар О.И. Низкоуглеродное развитие России: вызовы и возможности в новых условиях // Вестник международных организаций. 2023. Т. 18. № 4. С. 62–95
9. Распоряжение правительства Российской Федерации от 20.10.2021 №3052-р «О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341>, reference date: 10.07.2024.
10. Результаты реализации зеленой повестки в Китае. SBS Consulting. URL: <https://sbsconsulting.com/ru/press-releases/2024/07/15/100fc8b0600412777aa2ca57e.pdf>, reference date: 15.07.2024.

11. Федеральный закон "Об ограничении выбросов парниковых газов" от 02.07.2021 N 296-ФЗ (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/, reference date: 10.07.2024.
12. China Renewable Energy Outlook 2019 // CNREC. URL: <http://boostre.cnrec.org.cn/wpcontent/uploads/2019/12/CREO2019-Summary-191206.pdf>, reference date: 15.07.2024.
13. International Renewable Energy Agency, IRENA. URL:<https://www.irena.org/>, reference date: 15.07.2024.
14. Paris Agreement // United Nations. URL: <https://unfccc.int>, reference date: 10.07.2024.
15. State Council of China (2023c) China to implement demonstration projects featuring green, lowcarbon technologies. URL: http://english.www.gov.cn/news/202308/22/content_WS64e4aae9c6d0868f4e8dec1d.html, reference date: 10.07.2024.

References

1. Amurskaya M.A. Konceptiya nizkouglerodnoj ekonomiki i opyt Kitaya // Ekonomicheskie nauki. 2023. №1 (218). S. 142–147
2. Bashmakov I.A. Nizkouglerodnye tekhnologii v Rossii: Nyneshnij status i perspektivy. URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/Tehnologicheskij_razryv_1c905a5aa1.pdf, reference date: 10.07.2024
3. Bobylev S.N., Baraboshkina A.V., Dzhu Syuan. Prioritety nizkouglerodnogo razvitiya dlya Kitaya. Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik. Vypusk № 82, 2020. S. 114–139
4. Evchenko N.N., Van Syaohan. Perspektivy uglerodnoj nejtralnosti ekonomiki Kitaya: tekhnologicheskie innovacii i mezhgosudarstvennye proekty // Problemy prognozirovaniya. 2024. № 3 (204). S. 182–198.
5. Kranina E. I. Kitaj na puti k dostizheniyu uglerodnoj nejtralnosti // Finansovyy zhurnal. 2021. T. 13. № 5. S. 51–61.
6. Makeev YU.A., Salickij A.I., Semenova N.K. Dekarbonizaciya v Kitae: problemy osushchestvleniya energoperekhoda i finansirovaniya // Vostok (Oriens). 2022. № 1. S. 89–105.
7. Ohrana okruzhayushchej sredy v Rossii. 2020: Stat. sb./Rosstat. – 0-92 M., 2020. – 113s.
8. Popova I.M., Kolmar O.I. Nizkouglerodnoe razvitie Rossii: vyzovy i vozmozhnosti v novyh usloviyah // Vestnik mezhdunarodnyh organizacij. 2023. T. 18. № 4. S. 62–95
9. Rasporyazhenie pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 20.10.2021 №3052-r «O Strategii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda». URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341>, reference date: 10.07.2024.
10. Rezultaty realizacii zelenoj povestki v Kitae. SBS Consulting. URL: <cf38fc1f00fc8b0600412777aa2ca57e.pdf>, reference date: 15.07.2024.
11. Federalnyj zakon "Ob ogranichenii vybrosov parnikovyh gazov" ot 02.07.2021 N 296-FZ (poslednyaya redakciya). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/, reference date: 10.07.2024.
12. China Renewable Energy Outlook 2019 // CNREC. URL: <http://boostre.cnrec.org.cn/wpcontent/uploads/2019/12/CREO2019-Summary-191206.pdf>, reference date: 15.07.2024.
13. International Renewable Energy Agency, IRENA. URL:<https://www.irena.org/>, reference date: 15.07.2024.

14. Paris Agreement // United Nations. URL: [https:// unfccc.int](https://unfccc.int), reference date: 10.07.2024.
15. State Council of China (2023c) China to implement demonstration projects featuring green, lowcarbon technologies. URL: http://english.www.gov.cn/news/202308/22/content_WS64e4aac9c6d0868f4e8dec1d.html, reference date: 10.07.2024.

Comparing low-carbon development programs in Russia and China

Sadrinov Kirill

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: sadrinov.kirill@yandex.ru

Abstract. The article reveals and compares the ecological aspects of the low-carbon development programs of Russia and China. A distinctive feature of the countries is the continued increase in CO₂ emissions with a gradual plateau in 2030 and the achievement of carbon neutrality in 2060. A promising direction in the decarbonization of the economy is the development of technologies for carbon capture, absorption and conservation. By 2050, the transformation of energy systems in Russia is expected due to the prevalence of nuclear energy consumption - 37%, and the energy revolution in China due to an increase in the share of energy consumption on renewable energy sources to 58%. The Chinese low-carbon development programme is more extensive and ambitious than the Russian one, which is proved by comprehensive government support and maximum investment in low-carbon technologies through the established green lending system. China has a developed carbon market, which makes it possible to effectively implement climate projects, which is not typical for Russia.

Keywords: decarbonization, carbon neutrality, low-carbon technologies, carbon market, climate projects, renewable and nuclear energy

УДК 519.2:551.46:551.508.8

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-37-49

EDN: MULQXX

Временные тренды общего балла облачности и его составляющих в европейском секторе покрытия геостационарного спутника METEOSAT в первой четверти XXI века

Синицын Алексей Владимирович ^[0000-0002-3768-1474]

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: sinitsyn@sail.msk.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию временных трендов общего балла облачности и его составляющих по ярусам в европейском секторе покрытия спутника METEOSAT в первой четверти XXI века. Используя данные климатологий CLAAS-3, CLARA-A3 и SARAH3, а также методы Манна-Кендалла и линейной регрессии, проанализированы пространственно-временные изменения облачности и их влияние на приходящую коротковолновую радиацию. Полученные результаты позволяют выявить региональные и сезонные особенности облачности и солнечной радиации, что важно для энергетического планирования.

Ключевые слова: облачность, временные тренды, METEOSAT, коротковолновая радиация, Европейский сектор

1 Введение

В нашем исследовании мы ставим во главу угла изучение климатологии общего балла облачности, его пространственных и временных изменений [1,3]. Это имеет важное значение для выработки энергии в солнечных парках, поскольку состояние облачности влияет на коротковолновые потоки. Учет эффективности солнечных энергетических установок и правильное расположение парков являются ключевыми аспектами.

В марте 2024 года была опубликована климатология облачности, которая открывает возможности для пространственных и временных исследований общего балла облачности. Она также позволяет описать тенденции временного изменения облачности по ярусам.

Наши исследования проводились в европейском секторе покрытия геостационарного спутника METEOSAT. Для проверки результатов использовались данные других спутников, в частности, полярно-орбитальной миссии. Кроме того, мы рассмотрели отклик на изменчивость режимов облачности в данных коротковолновых потоков за указанный период времени. Европейский сектор был выбран из-за особенностей пространственного покрытия видимой области спутника METEOSAT.

2 Данные и методы

В данной работе для анализа временных трендов были использованы несколько климатических данных, представленных в таблице 1.

Облачные климатологии, используемые для изучения облачности, основаны на среднесуточных значениях общего балла облачности (ОБО) и его компонентов по ярусам: балла облачности верхнего (БВО), среднего (БСО) и нижнего (БНО) ярусов. В исследовании применялись данные об облачности из климатологии CLAAS-3: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI, Edition 3 [5].

Для проверки результатов, полученных для облачности и её компонент, была использована климатология CLARA-A3: CM SAF Cloud, Albedo and Surface Radiation Dataset from AVHRR Data, Edition 3 (CLARA-A ed. 3.0) [4].

Таблица 1. Характеристики климатологий

	CLAAS-3	CLARA-A3	SARAH ed.3
Период	2004-01-19 – 2024-01-19	2004-01-19 – 2024-01-19	2004-01-19 – 2024-01-19
Покрытие	65° ю.ш. – 65° с.ш. 65° з.д. – 65° в.д.	90.0° ю.ш. - 90.0° с.ш. 180.0° в.д. - 180.0° з.д. Глобальное	65° ю.ш. – 65° с.ш. 65° з.д. – 65° в.д.
Временное разрешение	Среднесуточные	Среднесуточные	Среднесуточные
Пространственное разрешение	0.05°x0.05°	0.25°x0.25°	0.05°x0.05°
Инструментарий	MVIRI/SEVIRI на спутниках METEOSAT	AVHRR на полярно орбитальных спутниках	MVIRI/SEVIRI на спутниках METEOSAT

Чтобы построить тренды проходящих коротковолновых потоков на поверхность Земли, были использованы спутниковые данные Surface Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 3,[6]. Все климатологии были предоставлены EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring.

Данные по облачности во всех этих источниках представлены в процентах от сплошного покрытия облаками (0-100%).

Для определения временных трендов общего балла облачности и его компонент по ярусам был использован метод Манна-Кендалла с уровнем значимости 0,05. Затем, при наличии значимого тренда, величина этого тренда была найдена с помощью метода линейной регрессии для соответствующего временного ряда значений общего балла облачности или его компонентов.

Метод Манна-Кендалла является удобным инструментом для массовых быстрых расчетов. Он основан на сравнении знаков разностей между соседними наблюдениями, позволяя выявлять наличие или отсутствие монотонной тенденции в значениях переменной Y . Этот метод не требует предположения о нормальности распределения данных и подходит для всех типов распределений.

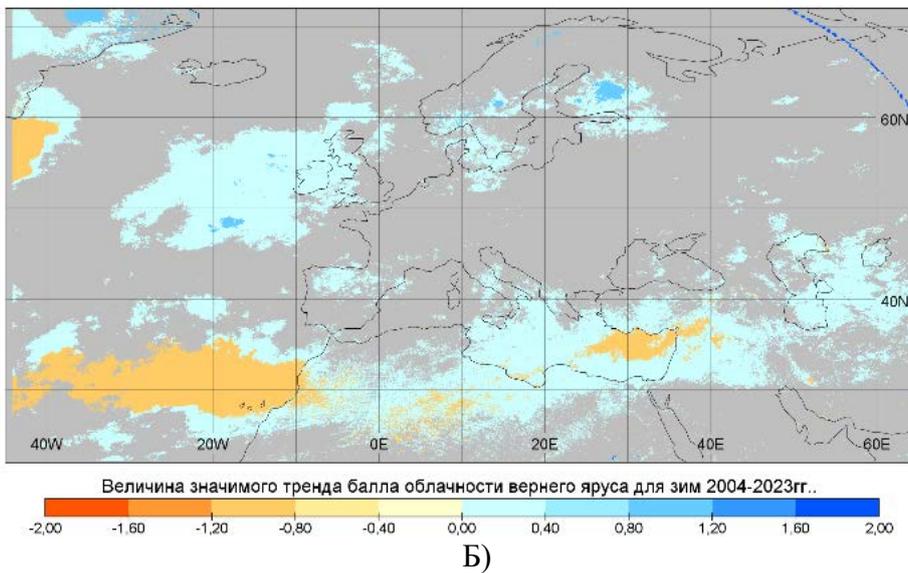
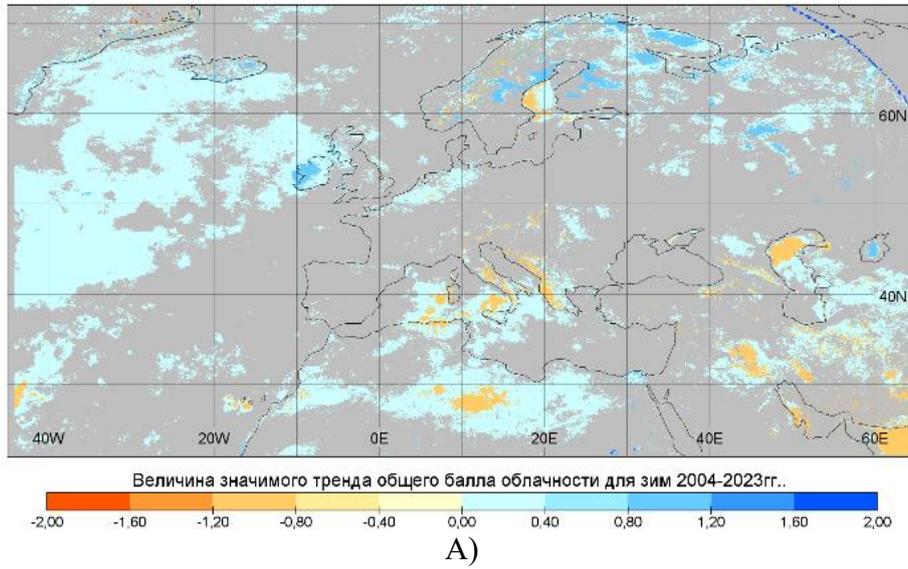
Данные были разделены на три временных ряда: 2004-2023, 2004-2013 и 2014-2023 годы. Для каждого сезона: зима (январь-февраль-март), весна (апрель-май-июнь), лето (июль-август-сентябрь) и осень (октябрь-ноябрь-декабрь) — были рассчитаны среднесезонные тренды значения общего балла облачности и его компонентов. Кроме того, были рассчитаны среднемесячные тренды этих значений для каждого месяца каждого временного ряда в отдельности.

3 Результаты

В период с 2004 по 2023 год величина значимых трендов не превышает $\pm 1,2\%$ в год как для ОБО, так и для его составляющих. При этом Северная Атлантика демонстрирует положительную величину тренда ОБО в течение всех сезонов. В Северной Африке отрицательный тренд для ОБО наблюдается в осенне-зимний период, а центральная часть Средиземного моря имеет отрицательный тренд только в зимний период. Передняя Азия характеризуется отрицательным трендом ОБО во второй половине года, при этом в весенний сезон для Персидского залива и Красного моря наблюдается положительный тренд ОБО порядка 1%. Для Европейской территории России положительные тренды на уровне 1% наблюдаются только в зимний период года.

Рассмотрим, как ведёт себя облачность для каждого яруса отдельно в этот период. Стоит отметить, что БСО для всех сезонов характеризуется минимальными значениями значимого тренда менее 0,6% для всех областей наблюдения. При этом БВО и БНО ведут себя как диполь с точки зрения сезонного тренда, это особенно заметно для зимнего периода. Область между 10° и 40° западной долготы на широте Канарских островов характеризуется положительным трендом для БНО порядка 1,2% и отрицательным для БВО, при этом ОБО значимого тренда не имеет (рис. 1). Такая же картина наблюдается и для области западнее острова Ирландия, только отрицательный тренд (частично) имеет нижний ярус облачности, но совместно с более обширным положительным трендом верхнего яруса облачности, положительный тренд имеет и ОБО. Для

европейской территории России положительный тренд ОБО определяется нижним ярусом облачности.



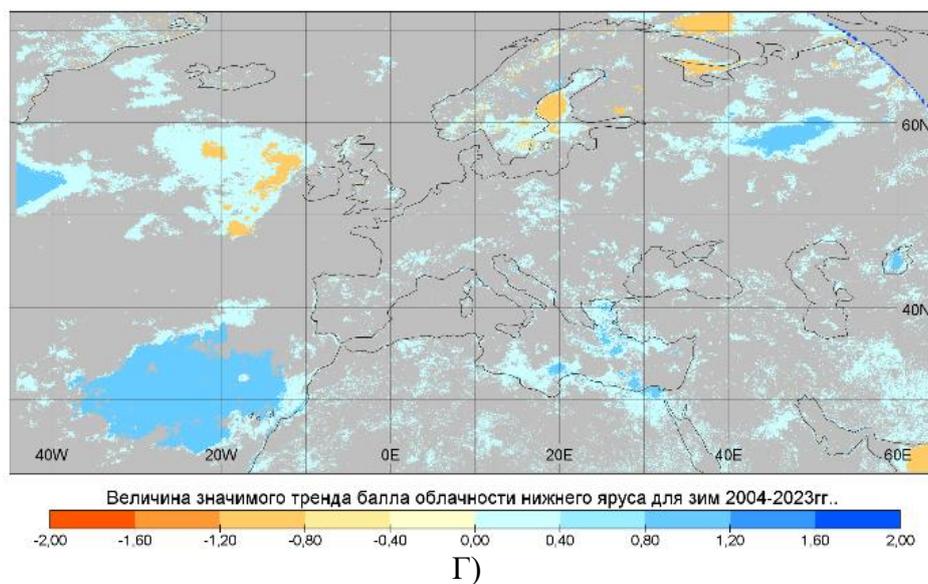
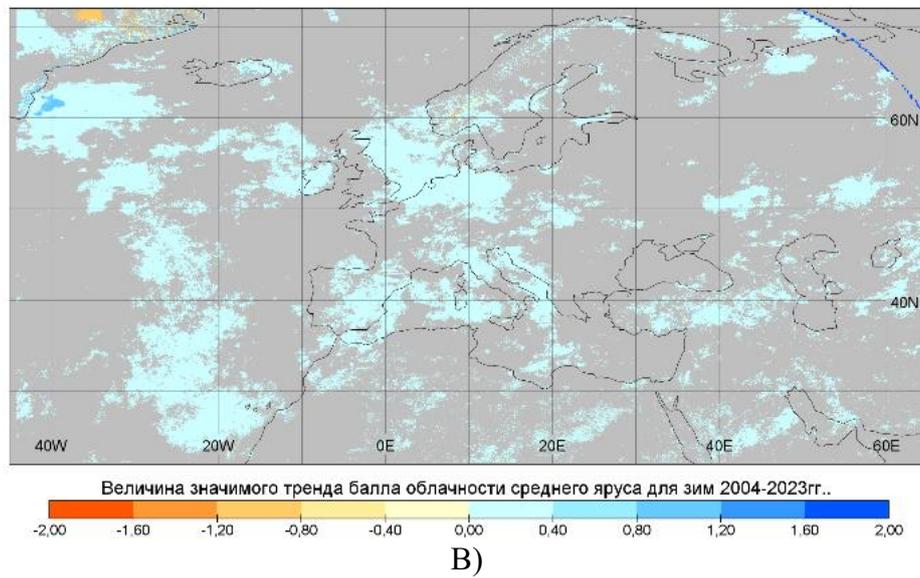


Рис. 1. Величина значимого тренда балла облачности (%) для зим 2004-2023гг. (а) – Общего балла облачности, (б) – для балла облачности верхнего яруса, (в) – для балла облачности среднего яруса, (д) – для балла облачности нижнего яруса.

В период с 2004 по 2013 год мы можем провести более детальный анализ тенденций в облачности. В зимний сезон на побережье Ботнического залива наблюдаются значительные положительные тренды общего балла облачности, достигающие 3-4%. Это связано с тем, что балл облачности нижнего яруса демонстрирует положительный тренд, составляющий около 3%.

Что касается Европейской территории России, то весной здесь наблюдается значительный отрицательный тренд ОБО, который составляет около 2%. Это связано с отрицательными трендами БНО и БСО, которые составляют примерно 1,5% и 1% соответственно.

В летний период в центральной и южной частях Европы отмечается отрицательный тренд ОБО, который может достигать 3%. Это связано с отрицательным трендом БСО. Также стоит отметить положительный тренд для балла облачности верхнего яруса, составляющий около 2% для Северной Европы. Однако этот тренд не находит отражения в общем тренде облачности для данного региона.

В осенний период над Европейской территорией России можно наблюдать ярусный диполь, при котором БВО демонстрирует положительный тренд около 1,5%, в то время как БНО характеризуется отрицательным трендом той же величины. Аналогичная ситуация наблюдается и в Центральной Европе, а также на Пиренейском полуострове.

В период с 2014 по 2023 год были выявлены региональные особенности в динамике облачности за последние 10 лет.

В восточной части Средиземного моря наблюдается тенденция к увеличению общего балла облачности на 3% в зимний период. В то же время в западной части Средиземного моря, его побережье и южных районах Европы отмечается тенденция к уменьшению ОБО, тренд составляет 3%. Это обусловлено устойчивым уменьшением балла верхней облачности и балла средней облачности на 2,5% для этого региона, особенно для январских наблюдений.

Аналогичная ситуация наблюдается в Бискайском заливе зимой, где к отрицательному тренду БНО добавляется положительный БСО. Величины этих трендов составляют порядка 1,5%.

Для весеннего сезона характерно наличие значимого тренда порядка 2% для западной части Средиземного моря, формирование этого тренда происходит путём увеличения балла облачности верхнего и нижнего яруса в этот период времени. Для восточной части Балтийского моря (Финский залив) в весенний период формируется значимый отрицательный тренд, порядка 3%, который формируется уменьшением балла облачности верхнего и нижнего ярусов. В центральной Европе наблюдается отрицательный тренд общего балла облачности порядка 1%, как следствие уменьшение балльности верхнего яруса.

Летний сезон характеризуется появлением значимого тренда, порядка 2% для северной части Италии, который возникает благодаря значимому тренду балла средней облачности в этом регионе — более 1%. При этом для всего Скандинавского полуострова характерен значимый положительный тренд общего балла облачности — 2%, который формируется облачностью верхнего и среднего ярусов.

Для северной части Франции в осенний период характерно наличие значимого положительного тренда общего балла облачности, порядка 2%, формируемого, по большей части облачностью верхнего яруса. Аналогичная ситуация наблюдается для Балеарского и Адриатических морей — тренда ОБО, примерно 2%, и формируется облачностью верхнего яруса.

В это же время в Северной Атлантике формируется трендовый диполь, при котором общий балл облачности (ОБО) не имеет значимого тренда, а нижний ярус облачности и пара верхнего и среднего ярусов формируют противоположные по знаку, но одинаковые по значению тренды порядка 2–2,5%. При этом наблюдается увеличение нижнего балла облачности и уменьшение балльности верхних ярусов.

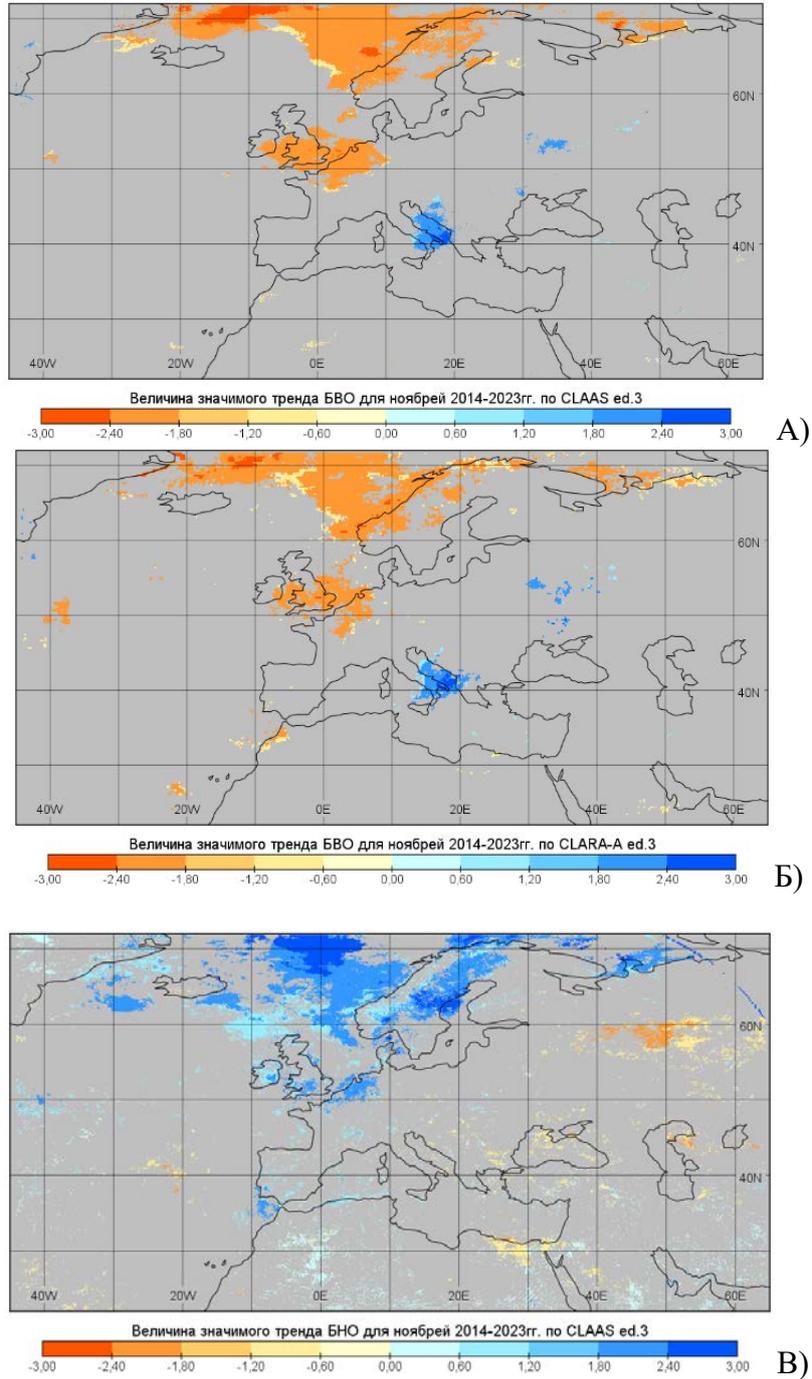
Анализ среднемесячных величин тренда балла облачности позволяет сделать вывод, что данный трендовый диполь формируется в основном в ноябре месяца. Этот же диполь для ноября месяца можно получить из анализа данных об облачности климатологии CLARA-A3, которую мы использовали для проверки полученных результатов.

На рисунке 2 представлен расчёт значимого тренда для общего балла облачности и балла облачности по ярусам по данным климатологий CLAAS ed.3 и CLARA-A ed.3 соответственно для среднемесячных величин 2014–2023 гг.

На рисунках чётко прослеживаются разные по знаку, но одинаковые по значению тренды БВО и БНО, которые дают в итоге нулевой тренд для ОБО. Также хорошо видно, что величины и области трендов для БВО и БНО хорошо согласуются, будучи рассчитанными по данным климатологий CLAAS ed.3 и CLARA-A ed.3.

При этом климатологии отличаются по методу получения данных об облачности: CLAAS — это данные с геостационарного спутника, полученные с помощью улучшенного вращающегося сканера-регистратора с разделёнными 12 спектральными каналами в видимом и инфракрасном диапазонах. В то время как CLARA-A — это данные, полученные с помощью сканирующего радиометра для получения изображений облачного покрова и поверхности Земли в видимом и инфракрасных участках спектра, установленного на полярно-орбитальных искусственных спутниках Земли [2].

В рамках исследования был проведён анализ динамики проходящих коротковолновых потоков на поверхности Земли за период с 2014 по 2023 год. Это позволило выявить тенденции изменений в последнее десятилетие.



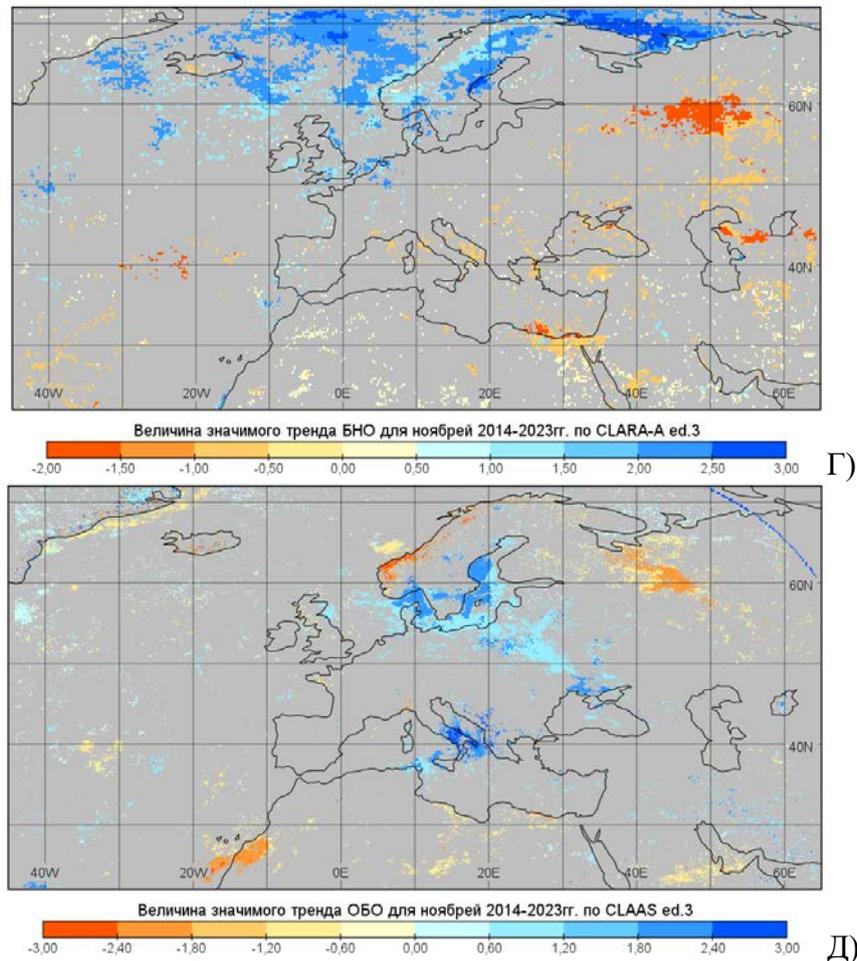


Рис. 2. Величина значимого тренда балла облачности (%) для ноябрь 2014-2023гг.: (а) и (б) – для балла облачности верхнего яруса по данным CLAAS ed.3 и CLARA-A ed.3 соответственно (в) и (г) – для балла облачности нижнего яруса по данным CLAAS ed.3 и CLARA-A ed.3, (д) – Общего балла облачности по данным CLAAS ed.3

Анализ тенденций указывает на то, что в зимний сезон наблюдается заметное увеличение входящих коротковолновых потоков на уровне 8 Вт/м^2 в южной части Европы и в Северной Африке. Это согласуется с отрицательной тенденцией ОБО в этом регионе (рис. 3). Аналогичная картина наблюдается и для северной части Скандинавского полуострова. Уменьшение общего балла облачности на 1-2% приводит к увеличению входящих потоков до 2-х Вт/м^2 .

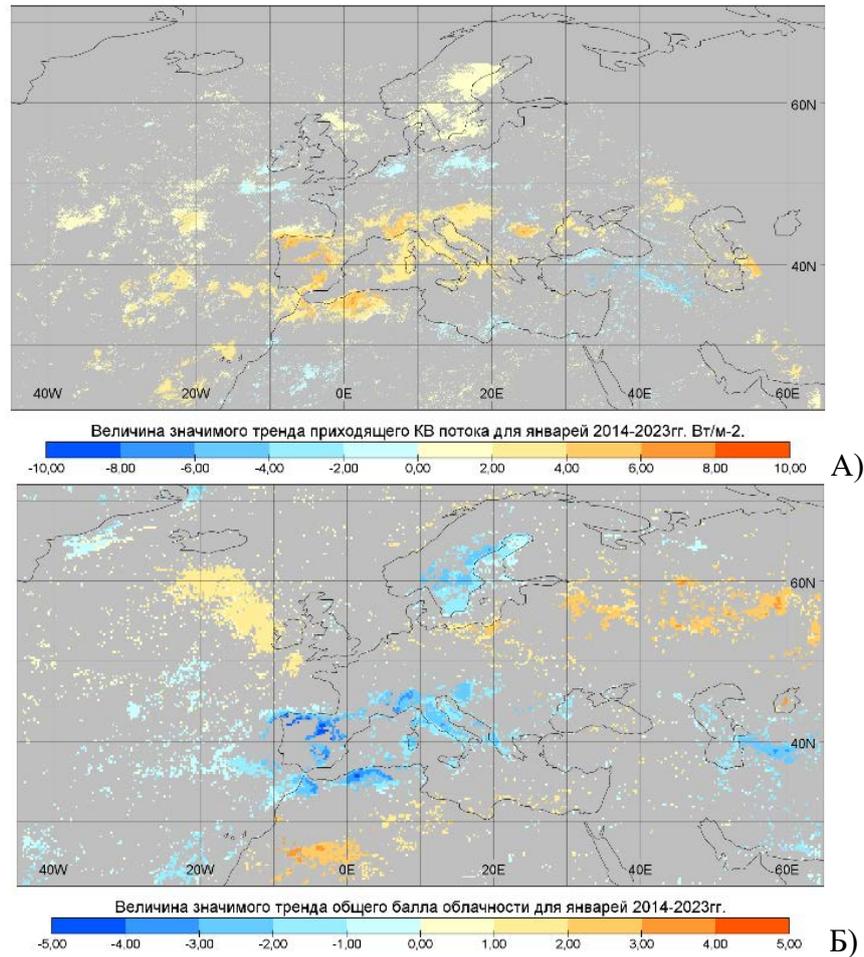


Рис. 3. Величина значимого тренда коротковолновых проходящих потоков на поверхности Земли (Вт/м-2) для январей 2014-2023гг. (а) и соответствующий им величины значимого тренда общего балла облачности (б) для январей 2014-2023 гг.

В районе пролива Босфор и на восточном побережье Мраморного моря наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению проходящих коротковолновых потоков на величину 6 Вт/м². Это связано с тем, что в этом районе наблюдается положительная тенденция в изменении облачности (ОБО) порядка 3%.

Для весеннего периода, наблюдаются устойчивые положительные тренды для проходящих коротковолновых потоков для восточной Европы на уровне 5-8 Вт/м², что хорошо согласуется с уменьшением ОБО для данного региона за последние 10 лет.

В летний период положительный тренд потоков солнечной радиации 6-7 Вт/м² наблюдается в Центральной Европе, где нами был отмечен отрицательный тренд ОБО ранее.

В осенний период наблюдается отрицательный тренд коротковолновых потоков солнечной радиации - 6 Вт/м² для Пиренейского полуострова, что хорошо согласуется с положительным трендом общего балла облачности 2-3% для данного региона.

4 Выводы

Значимые тренды для компонентов общего балла облачности могут проявляться в виде диполей, когда для одного яруса облачности наблюдается значительный положительный тренд, а для другого — отрицательный. В результате тренд общего балла облачности становится незначимым.

Для Европы наблюдается устойчивый отрицательный тренд общего балла облачности, составляющий около 3%. Этот тренд обусловлен уменьшением облачности на всех ярусах.

В результате уменьшения общего балла облачности над Европой в последние десять лет отмечаются значимые положительные тренды приходящей коротковолновой радиации, достигающие примерно 8-10 Вт/м².

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-15-2021-1398 (внутренний номер 13.2251.21.0120, уникальный идентификатор RF-2251.61321X0014).

В работе использованы данные, предоставленные Европейским центром спутниковых приложений для мониторинга климата (CM SAF).

Литература

1. Сеницын А. В., Гулев С. К. Применение оценки распределения вероятностей спутниковых данных об общем балле облачности для Мирового океана / Окружающая среда и энергосодержание. – 2023. – № 4(20). – С. 21-29. – DOI 10.24412/2658-6703-2023-4-21-29. – EDN LHEDEK
2. Сеницын А. В., Гулев С. К. Сравнительный анализ спутниковых баз данных приходящих коротковолновых потоков на поверхность Мирового океана / Океанология. – 2018. – Т. 58, № 5. – С. 689-695. – DOI 10.1134/S0030157418050167. – EDN XWVHVJ.
3. Aleksandrova M., S. K. Gulev, and K. P. Belyaev, “Probability distribution for the visually observed fractional cloud cover over the ocean” in *J. Clim.* 31, 3207–3232 (2018). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0317.1>
4. Karlsson, Karl-Göran; Riihelä, Aku; Trentmann, Jörg; Stengel, Martin; Solodovnik, Irina; Meirink, Jan Fokke; Devasthale, Abhay; Jääskeläinen, Emmihenna; Kallio-Myers, Viivi; Eliasson, Salomon; Benas, Nikos; Johansson, Erik; Stein, Diana; Finkensieper, Stephan;

- Håkansson, Nina; Akkermans, Tom; Clerbaux, Nicolas; Selbach, Nathalie; Schröder, Marc; Hollmann, Rainer (2023): CLARA-A3: CM SAF cLoud, Albedo and surface RAdition dataset from AVHRR data - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V003.
5. Meirink, Jan Fokke; Karlsson, Karl-Göran; Solodovnik, Irina; Hüser, Imke; Benas, Nikos; Johansson, Erik; Håkansson, Nina; Stengel, Martin; Selbach, Nathalie; Schröder, Marc; Hollmann, Rainer (2022): CLAAS-3: CM SAF CLOUD property dAtAset using SEVIRI - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003.
 6. Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Drücke, Jaqueline; Trentmann, Jörg; Schröder, Marc; Selbach, Nathalie; Hollmann, Rainer (2023): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003.

References

1. Sinitsyn A.V., Gulev S.K. Application of Satellite Data Probability Distribution Assessment for Total Cloud Cover over the World Ocean // *Journal of Environmental Earth and Energy Study*. – 2023. – No. 4(20). – Pp. 21-29. – DOI 10.24412/2658-6703-2023-4-21-29. – EDN LHEDEK.
2. Sinitsyn A.V., Gulev S.K. Comparative Analysis of Satellite Databases for Incoming Shortwave Radiation over the World Ocean Surface // *Oceanology*. – 2018. – Vol. 58, No. 5. – Pp. 689-695. – DOI 10.1134/S0030157418050167. – EDN XWVHVJ.
3. Aleksandrova M., S.K. Gulev, and K.P. Belyaev, “Probability distribution for the visually observed fractional cloud cover over the ocean” in *J. Clim.* 31, 3207–3232 (2018). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0317.1>.
4. Karlsson, Karl-Göran; Riihelä, Aku; Trentmann, Jörg; Stengel, Martin; Solodovnik, Irina; Meirink, Jan Fokke; Devasthale, Abhay; Jääskeläinen, Emmihenna; Kallio-Myers, Viivi; Eliasson, Salomon; Benas, Nikos; Johansson, Erik; Stein, Diana; Finkensieper, Stephan; Håkansson, Nina; Akkermans, Tom; Clerbaux, Nicolas; Selbach, Nathalie; Schröder, Marc; Hollmann, Rainer (2023): CLARA-A3: CM SAF Cloud, Albedo, and Surface Radiation Dataset from AVHRR Data - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V003.
5. Meirink, Jan Fokke; Karlsson, Karl-Göran; Solodovnik, Irina; Hüser, Imke; Benas, Nikos; Johansson, Erik; Håkansson, Nina; Stengel, Martin; Selbach, Nathalie; Schröder, Marc; Hollmann, Rainer (2022): CLAAS-3: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003.
6. Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Drücke, Jaqueline; Trentmann, Jörg; Schröder, Marc; Selbach, Nathalie; Hollmann, Rainer (2023): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003.

Temporal Trends of Total Cloud Cover and Its Components in the European Sector Covered by the Geostationary Satellite METEOSAT in the First Quarter of the 21st Century

Sinitsyn Alexey

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Email: sinitsyn@sail.msk.ru

Abstract. This paper examines the temporal trends of total cloud cover and its components by layers in the European sector covered by the METEOSAT satellite during the first quarter of the 21st century. Using data from the CLAAS-3, CLARA-A3 and SARA3 climatology's, as well as Mann-Kendall and linear regression methods, spatial and temporal changes in cloud cover and their impact on incoming shortwave radiation were analyzed. The results reveal regional and seasonal features of cloud cover and solar radiation, which are essential for energy planning.

Keywords: cloud cover, temporal trends, METEOSAT, shortwave radiation, European sector

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-1398 (internal No. 13.2251.21.0120, unique identifier RF-2251.61321X0014). The study utilized data provided by the European Center for Satellite Applications for Climate Monitoring (CM SAF).

УДК 620.92(477)

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-50-68

EDN: OWYXYQ

Оценка потенциала использования ветровой и солнечной энергии в Республике Дагестан

^{1,1} Сутаев Мансур Магарамович ^[0009-0002-6401-5175], ^{1,2} Алиев Расул Магомедович ^[0000-0002-0876-1301], ^{2,3} Бадавов Гасан Басирович, ^{1,4} Самедова Наиля Султан-Гамидовна ^[0009-0003-2465-6821], ^{1,5} Давудов Ибрагим Асхабович ^[0009-0002-4859-4998], ^{3,6} Светличная Татьяна Вячеславовна ^[0009-0002-1054-4477]

¹ Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Россия

² Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединённого института высоких температур РАН, г. Махачкала, Россия

³ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

E-mail: ¹ sutaev.mm@mail.ru, ² geopromooo@yandex.ru, ³ lotos155@yandex.ru, ⁴ sss2003nailya@gmail.com, ⁵ ibragim-davudov@mail.ru, ⁶ tata_svet_gaz@mail.ru

Аннотация. В статье проведен всесторонний анализ текущего состояния энергетической системы Республики Дагестан, выявлены ключевые проблемы, связанные с производством, распределением и потреблением энергии. Исследованы дефициты энергетических ресурсов и анализировано состояние инфраструктуры электросетей. В контексте решения проблемы энергетического дефицита предложен инновационный подход, основанный на внедрении ветровой и солнечной энергетики. Проведенный анализ показывает значительный потенциал этих возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан, учитывая ее уникальное географическое положение и природно-климатические особенности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, потенциалы ВИЭ, проблемы энергетики Дагестана, потребление энергии, ветровая энергетика, солнечная энергетика

1 Введение

Республика Дагестан занимает одно из ведущих мест среди субъектов Российской Федерации по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общей структуре выработки электроэнергии. По состоянию на 2021 год, 99%

всей произведённой электроэнергии приходится на гидроэлектростанции (ГЭС) [1].

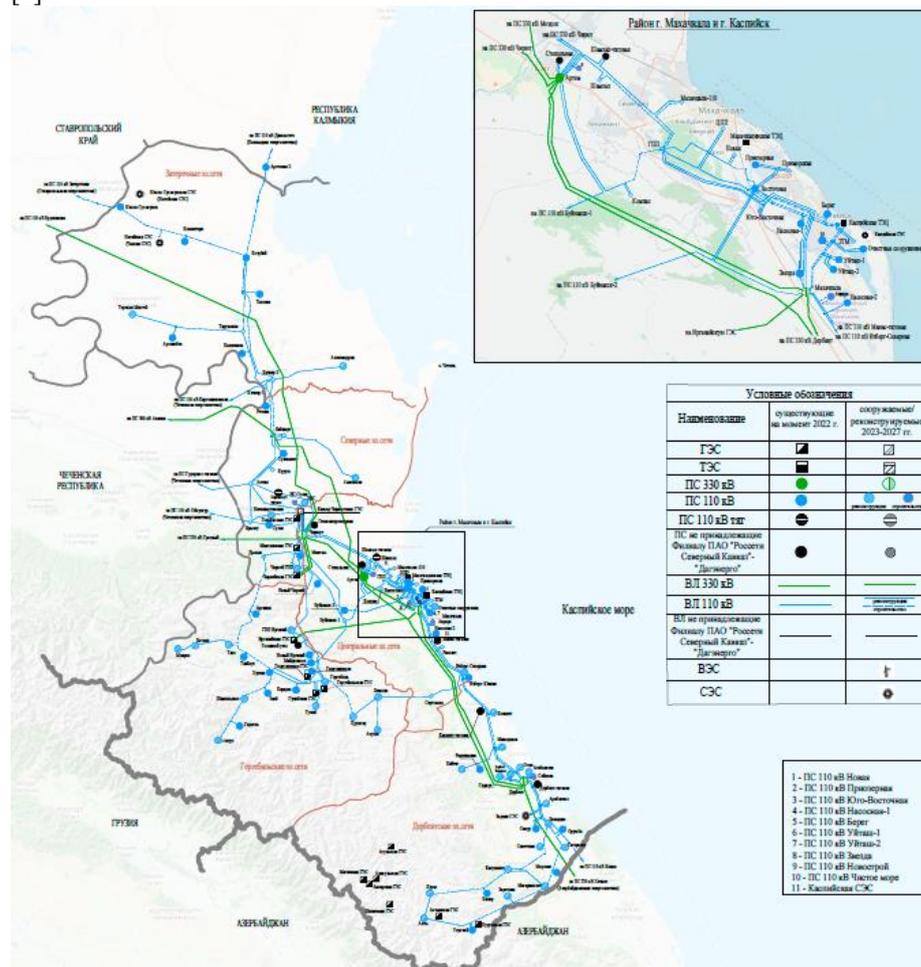


Рис. 1. Карта-схема электрических сетей 110 кВ и выше на территории Республики Дагестан с учетом пятилетней перспективы согласно плану Минэнерго РД по развитию электроэнергетики в Республики Дагестан

Несмотря на доминирующее положение гидроэлектростанций, Дагестан обладает возможностью для использования других возобновляемых источников энергии, таких как геотермальная энергия, ветровая и солнечная энергия, энергия морских волн, а также биоэнергия на основе бытовых и сельскохозяйственных отходов.

Распределение выработанной электроэнергии происходит за счет разветвлённой сети линий электропередач электроэнергетического комплекса напряжением

0,4/6/35кВ, протяженностью более 34 тыс. км, и магистральные электрические сети ЕЭНС 110/330 кВ, протяженностью 3649,8 км [2].

Однако неравномерное распределение существующих электросетей, а именно большая их концентрация в центральной части республики и почти полное отсутствие в северной и южной частях, является причиной больших потерь энергии при транспортировке (рис 1).

После того, как в 1974–1976 гг. была введена в эксплуатацию Чиркейская ГЭС, в республике был сформирован крепкий фундамент профицита электроэнергии, более того, Дагестан стал экспортером электроэнергии в соседние республики [3]. С 1990 года потребление электроэнергии сравнялось с выработкой, а ввод в эксплуатацию новых ГЭС помог только удерживать сложившийся баланс [4].

Несмотря на все перспективы и возможности, с 2000 года Дагестан испытывает дефицит электроэнергии, которая восполняется импортом из Ставропольского края и Азербайджанской Республики.

В таблице 1 представлен баланс электроэнергии в Республике Дагестан, а также рост населения и душевого потребления энергии [4,5].

Таблица 1. Баланс потребления электроэнергии Республики Дагестан

Год	Население, млн чел.	Выработка, млн кВт·ч	Потребление, млн кВт·ч	Дефицит, млн кВт·ч	Душевое потребление, кВт·ч/чел.
2000	2,443	3502,2	3596,2	-94	1472,28
2021	3,182	4846	7707	-2861	2422,02

На рисунке 2 представлен баланс электроэнергии Дагестана с 2000 по 2021 год.

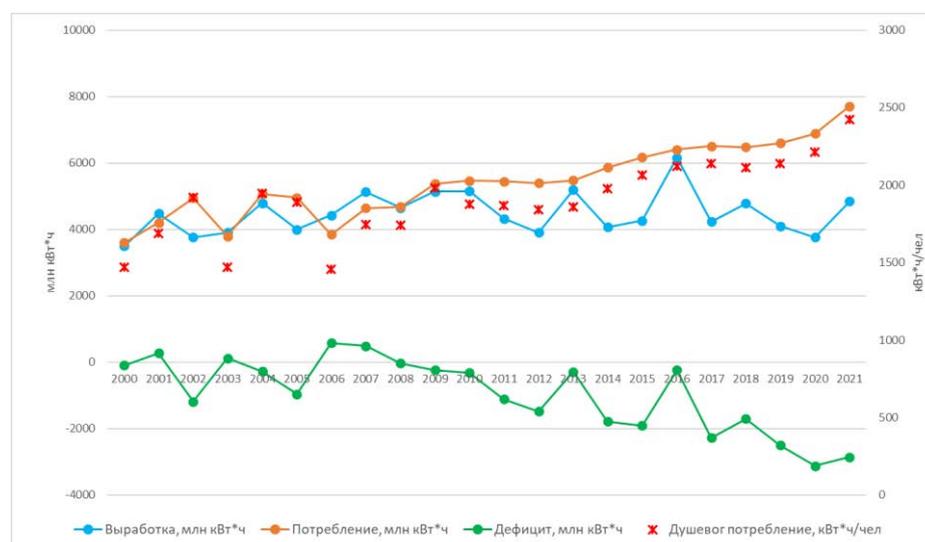


Рис. 2. Электроэнергетический баланс Республики Дагестан с 2000 по 2021 год

Проанализировав рис. 2 и таблицу 1 можно сделать следующие выводы:

1. За рассматриваемый период выработка электроэнергии выросла на 1343,8 млн кВт·ч/год, что в среднем равняется 64 млн кВт·ч/год ежегодно, однако среднеарифметическое значение выработки остается стабильной, около 4481,5 млн кВт·ч/год;

2. Население увеличилось на 30,3% (739 000,0 чел.), 35 190 чел. ежегодно;

3. Потребление увеличилось на 4110,8 млн кВт·ч/год, в среднем за год на 195,75 млн кВт·ч/год;

4. Потребление на душу населения, являющееся частным от объема потребляемой электроэнергии и численности населения, увеличилось на 64,5%, ежегодный прирост составляет 45,23 кВт·ч/чел.

Для более глубокого и полного понимания имеющихся тенденций энергетического сектора Республики Дагестан необходимо проанализировать структуру энергопотребления (таб. 2) и ее изменение за определенный период.

Таблица 2. Структура потребления электроэнергии в Республике Дагестан
2010 – 2020 гг.

№	Сфера потребления	2010		Группы		2020		Группы	
		млн кВт*ч	%						
1	Промышленное производство	423	8	1312	26	286	4	998	15
2	Сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыболовство	19	0,4			36	0,5		
3	Строительство	41	0			17	0,3		
4	Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	-	-			99	1		
5	Транспортировка и хранение	160	3			71	1		
6	Деятельность в области информации и связи					20	0,3		
7	Другие ВЭД	669	13			469	7		
8	Городское и сельское население	1705	34	1705	34	2930	43	2930	43
9	Потери в электросетях	2002	40	2002	40	2843	42	2843	42
Всего		5019	100	5019	100	6771	100	6771	100

Приведенные сферы потребления можно условно разделить на три группы в зависимости от объема потребления: городское и сельское население, потери электроэнергии и другие сектора.

Потребление электроэнергии в основном происходит за счёт двух секторов: городского и сельского населения и потерь в электросетях. Небольшая доля электроэнергии расходуется другими отраслями.

Анализ структуры энергопотребления Дагестана за выбранный период позволяет сделать следующие выводы:

1. Большая часть потребляемой электроэнергии порядка 40% от общего объема, теряется в распределительных сетях. Если сравнить потери за 2020 год, 2843 млн кВт*ч с объемом выработки за этот же год – 4910 млн кВт*ч, то получается, что 42,1 % вырабатываемой электроэнергии теряется;

2. Потребление электроэнергии населением выросло на 1225 млн кВт*ч, а в разрезе потребления от общего объема электропотребления, вырос с 34% до 43%, в то время как население выросло на 6,8 % (200609 чел.);

3. Потребление электроэнергии на душу населения выросло на 62,2%, с 585,86 кВт/чел. до 941,54 кВт/чел.;

4. Суммарное потребление остальных сфер упало на 314 млн кВт*ч, а в процентном соотношении от общего объема снизилось с 26 % до 15 %.

С увеличением потребления электроэнергии логичным образом растут его потери при транспортировке, однако остается на прежнем уровне процентное соотношение к общему объему потребления.

Потребление электроэнергии населением растет в относительных и абсолютных показателях, и является одним из главных причин ее роста, как за счет увеличения численности населения, так и за счет увеличения душевого потребления. Корреляция между ростом душевого потребления и увеличением общего электропотребления видна на рисунке 2.

Используя приведенные среднегодовые значения изменений ключевых показателей энергетики Дагестана, и воспользовавшись методом линейной экстраполяции, можно попытаться спрогнозировать изменение количества населения и характеристик энергетики к 2050 году:

1. Численность населения достигнет 4,2 млн человек;

2. Объем общего энергопотребления вырастет до 13,4 млн кВт*ч/год;

3. Потребление электроэнергии на душу численности населения достигнет уровня 3184,2 кВт/чел. в год, данный показатель в таких развитых странах как США равняется 12 984 кВт/чел. в год, Германия – 7 035 кВт/чел. в год, а в России – 6 603 кВт/чел. в год.

Прогнозы, представленные выше, указывают на будущие вызовы и текущие проблемы энергетики Республики Дагестан. Недостаток электроэнергии, значительные её потери при распределении, а также растущие потребности при ограниченных возможностях увеличения выработки за счёт существующих мощностей, 99% которых составляют ГЭС (таблица 3), чья производительность зависит от объема воды, создают условия, в которых республика вынуждена решать эти проблемы в условиях ограниченных экономических и временных ресурсов.

Таблица 3. Структура выработки электрической энергии на территории Республики Дагестан в период 2017–2021 годов в разрезе электростанций и с дифференциацией по собственникам, млн. кВтч

Наименование	2017	2018	2019	2020	2021	Среднее значение млн кВт·ч
Всего по территории, в т. ч.:	4232	4786	4116,3	3765,9	4846,41	4349,32
Филиал ПАО «РусГидро» – «Дагестанский филиал»	4180	4730	4062,9	3711,23	4791,87	4295,20
Чиркейская ГЭС	1801	1975	1738	1575,84	2041,84	1826,34
Ирганайская ГЭС	1100	1359	1048,7	949,38	1277,71	1146,96
Миатлинская ГЭС	555	618	546,3	498,55	632,83	570,14
Гоцатлинская ГЭС	282	277	260,1	242,88	322,23	276,84
Каскад Чирюртских ГЭС	372	384	363,8	328,62	304,87	350,66
Гельбахская ГЭС	15	37	21,4	18,5	96,52	37,68
Гергебильская ГЭС	15	40	41	45,18	57,38	39,71
Гунибская ГЭС	37	35	39,3	49,27	56,69	43,45
Малые ГЭС	3	5	4,26	3,01	1,81	3,42
ООО «Дагестанэнерго»	52	56	53,4	54,67	53,53	53,92
Махачкалинская ТЭЦ	52	56	53,4	54,67	53,53	53,92
ООО «Энергострой ЛТД»	0	0	0	0	0	0,00
Бавтугайская ГЭС	0	0	0	0	0	0,00
ООО «МЭК-Инжиниринг»	-	-	-	-	1,01	1,01
СЭС Каспийская15	-	-	-	-	1,01	1,01

Решение энергетических проблем в Республике Дагестан является крайне актуальной задачей, что также подтверждается исследованиями [13], посвящёнными анализу этих проблем и поиску методов их решения.

В работе [14] исследуются возможности перехода региона на устойчивое энергопотребление с использованием гидроэнергетических ресурсов. Авторы подчеркивают необходимость соблюдения баланса между экономическим ростом и экологическими ограничениями, акцентируя внимание на важности учета экологической ёмкости среды для достижения устойчивого развития.

Приводится детальный анализ текущего состояния энергопотребления, обсуждаются демографические и экологические аспекты, а также предлагаются конкретные меры по улучшению ситуации. Авторы отмечают, что для успешной реализации стратегии устойчивого развития необходимо интегрировать экономические и экологические подходы, учитывая при этом глобальный контекст.

Работа [15] посвящена исследованию проблем роста спроса на электроэнергию в Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО) в условиях интенсивного экономического развития. Авторы отмечают, что энергосистема региона сталкивается с такими проблемами, как нехватка мощностей, высокие потери электроэнергии и низкая платежная дисциплина среди потребителей, что угрожает стабильности энергоснабжения.

Для решения этих проблем предлагается модернизировать энергетическую инфраструктуру, обновить сети и оборудование, улучшить систему учета и контроля за потреблением электроэнергии, а также стимулировать энергосбережение среди населения и предприятий. Эти меры направлены на снижение потерь электроэнергии и повышение надежности энергосистемы.

В исследовании [16] рассматривается проблема энергетической зависимости региона от внешних поставок энергоресурсов и акцентируется внимание на необходимости развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В работе анализируется топливно-энергетический баланс республики, в котором до 90% природного газа и 100% твердого топлива завозится извне, что создает риски для энергетической безопасности. Авторы предлагают развивать ВИЭ как альтернативу традиционным энергоресурсам, включая гидроэнергетику, солнечную, ветровую и геотермальную энергию.

Статья [16] описывает республиканскую программу, целью которой является увеличение доли ВИЭ в энергетическом балансе региона. Программа включает строительство малых гидроэлектростанций, солнечных и ветроэлектрических станций, а также модернизацию систем геотермального теплоснабжения. Ожидается, что эти меры помогут не только улучшить энергоснабжение, но и сократить выбросы парниковых газов, а также способствовать экономическому развитию региона.

Авторы приводят детализированные планы по реализации проектов, включая показатели инвестиций, ожидаемые мощности и прогнозируемые объемы производства электроэнергии и тепла. Статья подчеркивает, что успешная реализация программы позволит существенно снизить зависимость Дагестана от внешних поставок энергоресурсов и повысить его энергетическую безопасность.

Исследования, направленные на решение текущих проблем в энергетическом секторе Республики Дагестан, представляют собой важную и ценную инициативу. Они помогут глубже понять существующие проблемы и вызовы, с которыми сталкивается энергетическая система региона.

В результате таких исследований можно будет разработать более эффективные стратегии и технологии, которые не только улучшат устойчивость и надежность энергоснабжения, но и способствуют внедрению инновационных технологий. Это, в свою очередь, откроет новые возможности для устойчивого экономического роста, улучшит качество жизни.

В данной работе предлагается использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в качестве метода решения ряда существующих проблем в энергетике Республики Дагестан. Географическое расположение и природно-климатические условия региона создают благоприятные условия для развития ВИЭ. Кроме того,

автономный характер ВИЭ может существенно сократить потери электроэнергии при её транспортировке на большие расстояния.

Например, значительная часть населения, проживающего в сельской местности, находится далеко от основных центров производства и импорта электроэнергии, и почти половина населения живёт в горных аулах и селениях. В этом контексте использование малых и крупных электростанций на основе ВИЭ позволит удовлетворить потребности местного населения непосредственно на местах, что сделает энергоснабжение более доступным и эффективным.

Дагестан имеет успешный опыт строительства солнечных электростанций. По состоянию на 2024 г. запущены 2 солнечные электростанции: Каспийская, действующая в режиме мощности 1 МВт и Южно-Сухокумская, установленной мощностью 15 МВт.

В настоящее время в Новолакском районе Дагестана у селения Гамиях ГК "ЭкоЭнерджи Групп" строится Махачкалинская ВЭС - первая в Дагестане ветряная электростанция, установленной мощностью 12,5 МВт и годовой выработкой электроэнергии 30 млн кВт·ч.

Объектом исследования в данной работе является энергообеспечение Республики Дагестан с использованием ВИЭ.

Статья ставит своей целью анализ технического потенциала использования ветровой и солнечной энергии для энергообеспечения Республики Дагестан.

2 Оценка технического потенциала ветровой энергетики

Ветровой режим Республики Дагестан определяется сочетанием сложного рельефа и влиянием Каспийского моря. Географическое положение региона на стыке Кавказских гор и прикаспийской низменности создает условия для формирования различных типов ветров.

Кавказские горы, простирающиеся на запад и юг Дагестана, играют ключевую роль в перераспределении воздушных потоков. Воздух, поднимаясь на горные склоны, охлаждается, вызывая посадку, а затем, опускаясь на пределы, нагревается, образуя тёплые и сухие фёны. В зимний период холодные наземные массы, опускающиеся с гор, создают порывистые ветры — боры, которые могут резко понижать температуру и усиливать ветровую нагрузку.

Каспийское море, расположенное в восточной части региона, оказывает смягчающее воздействие на климат прибрежных районов, особенно летом, когда усиливаются муссонные ветры. Эти сезонные ветры, дующие с моря на сушу, и обуславливают жаркий климат побережья. Летом преобладают восточные и юго-восточные ветры, влияющие на температуру и влажность воздуха, а зимой более холодные северо-западные ветры приносят сухие и холодные наземные массы.

В Дагестане наибольшая активность ветра наблюдается в основном в северной части республики, тогда как в горной части преобладает штилевая погода [18]. Особенностью ветрового режима являются сильные ветры северо-западного и юго-восточного направлений, которые дуют 7-8 дней в месяц и несут с собой массу пыли и песка. При этом максимальная скорость ветра северо-западного

направления достигает 31 м/с, юго-восточного – 28 м/с. Сильные юго-восточные ветры наблюдаются около 200 дней в году.

Таким образом, ветровой режим Дагестана формируется под влиянием гор и моря, создавая благоприятные условия, для использования ветряных электростанций в качестве источника электроэнергии.

Ввиду наличия различных скоростей ветра, и поскольку работа посвящена оценке потенциала ветровых электростанций на территории всей республики, а не отдельно взятого участка, будет уместным взять в качестве исходных данных различные скорости ветра, в интервале от 3 м/с до 15 м/с.

Расчет электрической мощности горизонтально-осевых ветряных электростанций (ВЭУ) при заданной скорости ветра и диаметре ветроколеса производится по формуле [8]:

$$P_{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot D^2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ВЭУ}}$ – выходная электрическая мощность горизонтально-осевых ВЭУ, Вт; D^2 – диаметр ветроколеса, м; v – скорость ветра, м/с; ρ – плотность воздуха (при нормальных условиях $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; C_p – коэффициент использования энергии ветрового потока, 0,45 – 0,52 [8]; $\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}}$ – суммарный КПД механических и электрических элементов силового тракта ВЭУ, 0,9 – 0,95 [8].

Мощность ВЭС, состоящей из N ветроустановок, рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ВЭС}} = N_{\text{установок}} \cdot P_{\text{ВЭУ}} \quad (2)$$

где $P_{\text{ВЭС}}$ – мощность ВЭС, Вт;

Поскольку нет общепринятой схемы расположения ВЭУ, то для оценки мощности ВЭС произведём расчет для схемы расположения ВЭУ – от 5D×7D (рисунок 3). Количество ветроустановок, которые входят в состав ВЭС площадью S , и при схеме установки ветроустановок 5D×7D, рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{установок}} = \frac{S}{5D \cdot 7D} = \frac{S}{35D^2} \quad (3)$$

где S – площадь ВЭС, км²;

Подставив формулы (1) и (3) в (2), получим:

$$P_{\text{ВЭС}} = \frac{S}{35D^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot D^2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (4)$$

Сократив значения D^2 получим итоговую формулу расчета электрической мощности ВЭС, расположенной на площади S :

$$P_{\text{ВЭС}} = \frac{S}{35} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (5)$$

Из вышеприведенных расчетов, видно, что на мощность ВЭС не влияет диаметр ветроколеса ВЭУ, поскольку его изменение компенсируется количеством ВЭУ, которые располагаются на рассматриваемой площади S.

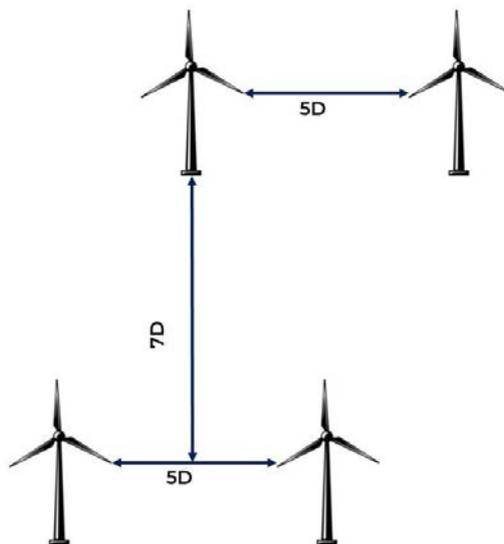


Рис. 3. Модель расстановки ВЭУ

Главным фактором, оказывающим влияние на количество вырабатываемой электроэнергии на ветряных электростанциях, при условии прямоугольной схемы размещения горизонтально-осевых ВЭУ, является схема расположения ВЭУ, которая диктуется условиями компенсации аэродинамического затенения и геометрических размеров ВЭУ [10, 11].

Воспользовавшись формулой (5), произведем расчеты электрической мощности ВЭС при скоростях ветра от 3 м/с до 15 м/с, расположенной на различных площадях, результаты которых представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчета мощности ВЭС разной площади при различных скоростях ветра, тыс. кВт

Площадь ВЭС, км ²	Скорость ветра, м/с						
	3	5	7	9	11	13	15
1	0,15	0,7	1,9	4,1	7,4	12,2	18,8
2	0,30	1,4	3,8	8,1	14,8	24,4	37,6
3	0,45	2,1	5,7	12,2	22,2	36,7	56,3

Площадь ВЭС, км ²	Скорость ветра, м/с						
	3	5	7	9	11	13	15
4	0,60	2,8	7,6	16,2	29,6	48,9	75,1
5	0,75	3,5	9,5	20,3	37,0	61,1	93,9
6	0,90	4,2	11,5	24,3	44,4	73,3	112,7
7	1,05	4,9	13,4	28,4	51,8	85,6	131,4
8	1,20	5,6	15,3	32,5	59,2	97,8	150,2
9	1,35	6,3	17,2	36,5	66,6	110,0	169,0
10	1,50	7,0	19,1	40,6	74,1	122,2	187,8
25	3,76	17,4	47,7	101,4	185,1	305,6	469,4
50	7,51	34,8	95,4	202,8	370,3	611,2	938,9
100	15,0	69,6	190,8	405,6	740,5	1222,3	1877,7
500	75,1	347,7	954,1	2028,0	3702,6	6111,7	9388,7
1000	150,2	695,5	1908,3	4055,9	7405,3	12223,4	18777,4
10000	1502,2	6954,6	19083,4	40559,3	74052,7	122234,2	187774,5
50000	7511,0	34773,0	95417,2	202796,4	370263,4	611171,1	938872,3
100000	15022,0	69546,1	190834,5	405592,8	740526,8	1222342,1	1877744,5

Следующим шагом необходимо выяснить какую площадь должна иметь ВЭС для выработки электроэнергии равной значению потребления и дефицита электричества в Республике Дагестан при скоростях от 3 м/с до 15 м/с.

Результаты проведенных расчетов по формуле (5) приведены в таблице 5.

Таблица 5. Значение площади, необходимой ВЭС для выработки электроэнергии равной значению выработки, потребления и дефициту электроэнергии в Республике Дагестан за 2021 год, км²

Скорость ветра, м/с		3	5	7	9	11	13	15
Выработка, 4846 млн кВт*ч	Площадь, км ²	32264	6968	2539	1195	654	396	258
	Процент от общей площади, %	64,14	13,85	5,05	2,38	1,30	0,79	0,51
Потребление, 7707 млн кВт*ч	Площадь, км ²	51312	11082	4039	1900	1041	631	410
	Процент от общей площади, %	102,01	22,03	8,03	3,78	2,07	1,25	0,82
Дефицит, 2861 млн кВт*ч	Площадь, км ²	19048	4114	1499	705	386	234	152
	Процент от общей площади, %	37,87	8,18	2,98	1,40	0,77	0,47	0,30

В соответствии с таблицей 5 при скорости ветра 8 м/с, для выработки объема электричества равного значению дефицита за 2021 год нужна ВЭС площадью 1004 км², для покрытия всего потребления нужна электростанция площадью

2706 км², ну а для покрытия объема, равного объему выработанной электроэнергии, ВЭС площадью 1701 км².

Если сравнить эти данные с площадью Республики Дагестана, равной 50 300 км², то 1004 км² – это 2,0%, 2706 км² – это 5,38%, а 1701 км² – это 3,38%.

3 Оценка технического потенциала солнечной энергетики

Одной из важных характеристик Дагестана для расчета потенциала использования солнечной энергетике является его солнечная активность.

В течение года в Дагестане наблюдается значительное количество солнечных дней. В среднем по региону количество солнечных дней может варьироваться от 200 до 250 в год, в зависимости от конкретной местности. Например, в прибрежных районах, таких как Махачкала и Дербент, солнечных дней, как правило, больше благодаря влиянию Каспийского моря и более мягкому климату. В горных районах, таких как Гуниб или Хунзах, климат более суровый, и здесь количество солнечных дней может быть несколько ниже, особенно зимой, когда наблюдаются частые облачные и пасмурные дни.

Если рассматривать среднее количество солнечных часов в год, то в Дагестане этот показатель составляет от 2200 до 2500 часов. В течение летних месяцев продолжительность светового дня достигает своего максимума: в июне и июле солнечные дни могут длиться от 14 до 15 часов. Это время года с самой высокой солнечной активностью.

Зимой продолжительность светового дня значительно сокращается. В декабре и январе световой день составляет около 8-9 часов. Однако даже в зимние месяцы в Дагестане часто бывают солнечные дни, особенно в прибрежных районах, где климат мягче и влияние Каспийского моря сглаживает перепады температур.

Распределение солнечных часов по времени года выглядит следующим образом. Летом, в период с июня по август, наблюдается наибольшее количество солнечного света. В это время световой день длится до 14-15 часов. Осенью, начиная с сентября, продолжительность светового дня постепенно сокращается, и к ноябрю она составляет уже 9-10 часов. Однако осень в Дагестане всё ещё может быть довольно солнечной, особенно в её ранний период.

Зимой, как уже было сказано, световой день минимален, особенно в декабре и январе, когда он может составлять всего 8-9 часов. Весной, начиная с марта, световой день вновь увеличивается, и к маю достигает 13-14 часов, что сопровождается увеличением количества солнечных дней и интенсивности солнечного света.

Таким образом, Дагестан — это регион, который получает значительное количество солнечного света в течение года.

Приведенные характеристики указывают на имеющийся потенциал использования солнечной энергии. Однако для расчетов нужны конкретные значения среднемесячной инсоляции, значения которых в г. Махачкале приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения инсоляции в Республике Дагестан

Месяц	Инсоляция, кВт*ч/м ² /месяц	Инсоляция, кВт*ч/м ² /день
Январь	48,2	1,55
Февраль	77	2,75
Март	128	4,13
Апрель	168	5,60
Май	200	6,45
Июнь	190	6,33
Июль	208	6,71
Август	196	6,32
Сентябрь	161	5,37
Октябрь	132	4,26
Ноябрь	93	3,10
Декабрь	77,2	2,49
Год	1678,4	4,59

Полученные значения уровня инсоляции показывают, что годовое значение равняется 1678,4 кВт*ч/м²/год, а суточное 4,59 кВт*ч/м²/день.

Однако данные значения являются усредненными, и на территории республики есть места, где значение инсоляции выше или ниже указанного значения 4,59 кВт*ч/м²/день, поэтому для расчетов возьмем диапазон инсоляции от 3 кВт*ч/м²/день до 10 кВт*ч/м²/день.

Расчет теоретического потенциала солнечной электростанции (СЭС) производится по формуле:

$$P_{\text{СЭС}_{\text{теор}}} = I_{\text{день}} \cdot 365 \cdot S_{\text{общ}_{\text{рД}}} \quad (6)$$

где $I_{\text{день}}$ — уровень инсоляции, кВт*ч/м²/сутки; $S_{\text{общ}_{\text{СЭС}}}$ — общая площадь солнечной электростанции, м²; 365 — количество дней в году.

Технический потенциал можно рассчитать по следующей формуле

$$P_{\text{СЭС}_{\text{технич}}} = P_{\text{СЭС}_{\text{теор}}} \cdot \text{КИУМ} \quad (7)$$

где КИУМ — коэффициент использования установленной мощности СЭС.

Рассчитывается КИУМ как отношение процента фактической мощности СЭС, от установленной мощности. Например, за 2019 год фактическая мощность солнечных электростанций в мире составляет 82,7 ГВт, а установленная мощность равняется 586,4 ГВт. От установленной мощности, фактическая мощность за 2019 год равняется 14,1%, следовательно, значение КИУМ для расчета будет взято 14,1% или 0,141.

Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6. Значение мощности солнечной электростанции различной площади и при различных значениях инсоляции, млрд кВтч

Площадь СЭС, км ²	Значения инсоляции, кВт*ч/м ² /день						
	3	4	4,59	5	7	9	10
1	0,15	0,21	0,24	0,26	0,36	0,46	0,51
2	0,31	0,41	0,47	0,51	0,72	0,93	1,03
3	0,46	0,62	0,71	0,77	1,08	1,39	1,54
4	0,62	0,82	0,94	1,03	1,44	1,85	2,06
5	0,77	1,03	1,18	1,29	1,80	2,32	2,57
6	0,93	1,24	1,42	1,54	2,16	2,78	3,09
7	1,08	1,44	1,65	1,80	2,52	3,24	3,60
8	1,24	1,65	1,89	2,06	2,88	3,71	4,12
9	1,39	1,85	2,13	2,32	3,24	4,17	4,63
10	1,54	2,06	2,36	2,57	3,60	4,63	5,15
25	3,86	5,15	5,91	6,43	9,01	11,58	12,87
50	7,72	10,29	11,81	12,87	18,01	23,16	25,73
100	15,4	20,59	23,62	25,73	36,03	46,32	51,47
500	77,2	102,9	118,1	128,66	180,1	231,6	257,3
1000	154,4	205,9	236,2	257,33	360,3	463,2	514,6
2500	386,0	514,7	590,6	643,31	900,6	1158,0	1286,6

Далее рассчитаем необходимую площадь СЭС для выработки количества электроэнергии, равной объему потребления, выработки и дефицита электричества, а Республике Дагестан при различных уровнях инсоляции.

Результаты расчетом представлены в таблице 7.

Таблица 7. Значение площади, которое необходимо СЭС для выработки электроэнергии равной значению выработки, потребления и дефициту электроэнергии в Республике Дагестан, км²

Значение инсоляции, кВт*ч/м ² /день		3	4	4,59	5	7	9	10
Выработка, 4846 млн кВт*ч	Площадь, км ²	31,4	23,5	20,51	18,83	13,45	10,46	9,42
	Процент от общей площади, %	0,06	0,05	0,041	0,037	0,027	0,021	0,019
Потребление, 7707 млн кВт*ч	Площадь, км ²	50,0	37,4	32,63	29,95	21,39	16,64	14,98
	Процент от общей площади, %	0,01	0,07	0,065	0,06	0,043	0,033	0,03
Дефицит, 2861 млн кВт*ч	Площадь, км ²	18,5	13,9	12,11	11,12	7,94	6,18	5,56
	Процент от общей площади, %	0,04	0,03	0,024	0,022	0,016	0,012	0,011

Как видно из таблицы 7, с увеличением уровня инсоляции увеличивается вырабатываемая мощность СЭС, все меньше становится необходимая СЭС площадь для выработки электроэнергии равной уровню производства, потреблению и дефициту электроэнергии в Республике Дагестан.

Для выработки объема электроэнергии, эквивалентного уровню потребления в Республике Дагестан, при уровне инсоляции в Махачкале, равном 4,59 кВт*ч/м² в сутки, требуется солнечная электростанция (СЭС) площадью 32,63 км², что составляет 0,065% от общей площади Республики Дагестан. Для СЭС с мощностью, эквивалентной выработке электроэнергии Дагестана за 2021 год, необходима площадь 20,51 км², что составляет 0,041% от территории республики. Для покрытия дефицита электроэнергии потребуются СЭС площадью 12,11 км², что эквивалентно 0,024% площади Дагестана или примерно 1700 футбольным полям размером 105 м на 68 м.

4 Выводы

Приведённые выше расчеты были выполнены в рамках концепции подключения электростанций на основе возобновляемых источников энергии к централизованной энергосистеме, для энергообеспечения потребителей через существующую сеть энергоснабжения, по результатам которых можно сделать следующие выводы:

1. Потребление электроэнергии в Республике Дагестан стремительно растет, в основном за счет увеличения численности населения и объема душевого энергопотребления;

2. Энергосистема Республики Дагестан нуждается в серьезном капитальном ремонте, особенно линий электропередачи, по которым в 2020 году при транспортировке было потеряно 2843 млн. кВт*ч;

3. Для выработки объема электроэнергии равной уровню потребления за 2021 год (7707 млн. кВт*ч) с помощью ветровых электростанций (ВЭС) при скорости ветра 6 м/с необходима площадь 4032 км², что составляет 8,02 % от общей территории Дагестана, аналогичное значения для дефицита электричества 2381 км², 4,73 % от общей площади;

4. Для выработки объема электроэнергии равной уровню потребления за 2021 год с помощью солнечных электростанций (СЭС) при уровне инсоляции, принятой среднегодовому значению по городу Махачкала – 4,59 кВт*ч/м²/день, необходима СЭС площадью 32,63 км², 0,041 % от общей площади, аналогичное значения для дефицита электричества 12,11 км², 0,024 % от общей площади;

5. Технический потенциал электростанций на основе солнечной энергетики в Республике Дагестан выше, чем у ветровой.

Как показано в таблице 2, главным фактором роста электропотребления является население. Небольшая часть этого увеличения обусловлена ростом численности населения, а основная доля приходится на увеличение потребления электроэнергии на душу населения. Этот показатель особенно интенсивно растёт среди сельского населения, так как многие жители сельских районов до сих пор

не полностью используют весь спектр бытовой и другой техники, но начинают активно внедрять её в быт.

Значительная часть потребителей в Дагестане, особенно в сельских районах, расположена на большом расстоянии от источников генерации электроэнергии. При этом с увеличением расстояния транспортировки возрастают ее потери.

Значительная часть потребителей в Дагестане, особенно в сельских районах, расположена на большом расстоянии от источников генерации электроэнергии. При этом с увеличением протяжённости транспортировки электроэнергии возрастают ее потери.

В 2020 году, электропотребление в Дагестане составило 6888 млн кВт*ч, а потери в электросетях при транспортировке 2843 млн кВт*ч, получается, что для энергообеспечения республики необходимо выработать 9731 млн кВт*ч электричества, или + 30% от фактического объема потребления.

С учётом сказанного, применение автономных электростанций на основе возобновляемых источников энергии для децентрализованного энергоснабжения удалённых районов становится одним из ключевых инструментов в борьбе с потерями и дефицитом электроэнергии, которые ещё будут нужны для полного обеспечения электроэнергией.

Это решение позволяет снизить нагрузку на централизованную сеть и минимизировать потери при передаче электроэнергии, поскольку генерация происходит в непосредственной близости от потребителей.

Основной недостаток возобновляемых источников энергии заключается в их непостоянстве: солнце светит только в дневное время, а ветер не всегда дует. В этом контексте использование комбинированных электростанций совместно с накопителями электричества могут стать привлекательным решением.

Удалённость источников электроэнергии от потребителей и изношенность распределительных сетей, приводит к значительным потерям при транспортировке электроэнергии, которой, итак, не хватает. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) становится кардинальным решением для энергосистемы Республики Дагестан. Преимущества ВИЭ, такие как отсутствие потерь при транспортировке, отсутствие необходимости строительства ЛЭП и благоприятные природно-климатические условия, делают этот шаг важным на пути к самообеспечению региона электричеством.

Основной задачей данного исследования было изучение технического потенциала ветровых и солнечных электростанций в Республике Дагестан. В дальнейшем планируется исследовать экономическую эффективность их использования, что станет предметом последующих исследований авторов.

Литература

1. Дагестанский филиал ПАО "РусГидро" – производство электроэнергии в 2021. – URL: <https://dagestan.rushydro.ru/branch/activity/proizvodstvo-elektro-energii/> (дата обращения 18.04.2024).

2. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Республики Дагестан на период 2023-2027 годов – URL: <file:///C:/Users/Gasan/Downloads/9d8LLEA9ahz8F5ceh2IU.pdf> (дата обращения 18.04.2024).
3. Дагестанский филиал ПАО "РусГидро" – история гидроэнергетики Дагестана в цифрах и фактах/ - URL: <http://www.dagestan.rushydro.ru/hpp/hpp-history/> (дата обращения 18.04.2024).
4. Алибеков А. Б. Об истории энергетики Дагестана на рубеже XX–XXI вв. Газета «Новое Дело». 19 декабря 2022 г.
5. Федеральная служба государственной статистики. - URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 18.04.2024).
6. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: - ИД «Энергия». 2010, 320 с.
7. Исроилов Б.И., Сутаев М.М., Мингалеева Р.Д., Бессель В.В. Оценка потенциала ветровой и солнечной энергии России и КНР//Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2022. – № 3. – С. 124 – 139.
8. Мингалеева Р.Д., Бессель В.В. Методика оценки суммарной мощности ветроэлектростанции // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 9. – С. 84 – 88.
9. Природный газ – основа устойчивого развития мировой энергетики: Монография/В.Г. Мартынов, В.В. Бессель, В.Г. Кучеров, А.С. Лопатин, Р.Д. Мингалеева. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – 173 с.
10. Развитие возобновляемой энергии в России: технологии и экономика: Учебное пособие /Под ред. А.Б. Чубайса, В.А. Зубакина, А.Е. Копылова. – М.: Издательская группа «Точка», 2020. – 464 с.
11. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. – 3-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 424 с.
12. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Volume Two. Wind Energy // Elsevier Ltd – 2012. – P. 746.
13. Алхасов А.Б., Чернявский А.А., Бадавов Г.Б., Алиев Р.М., Ниналалов С.А. О создании центра научно-технологического мониторинга потенциалов возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы: Материалы V Международной конференции, 23-26 октября 2017 г. Т.1. Махачкала: АЛЕФ, 2017. С. 99-197.
14. Абдурахманов Г.М., Алхасов А.Б., Ахмедова Л.Ш., Гасанов Ш.Ш., Мурзаканова Л.З. Потенциал и перспективы экологизации энергопотребления в Дагестане // Юг России: экология, развитие. №1, 2011. С. 131 – 138
15. Килинкарлова С.Г., Гладкова Н.В. Анализ структуры потребления электроэнергии в регионах интенсивного развития // Известия УрГЭУ 1 (51) 2014. С. 55 – 61.
16. Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А. Вопросы республиканской целевой программы «использование возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан» Региональные проблемы преобразования экономики, №9, 2015. С. 36 – 42.
17. BP Statistical Review of World Energy. – 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefind->

mkaj/https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf;

18. Камилова А.М. Исследование ветровой активности на территории Дагестана с помощью геоинформационного моделирования // "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов". Материалы III Школы молодых учёных им. Э.Э. Шпилеррайна: к 30-летию Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН / Под ред. д.т.н. Алхасова А.Б. Махачкала. 2010. С. 162-166.

References

1. Dagestan branch of PJSC RusHydro – electricity production in 2021. – URL: <https://dagestan.rushydro.ru/branch/activity/proizvodstvo-elektroenergii/> (access date: 18/04/2024).
2. Scheme and program for the development of the electric power industry of the Republic of Dagestan until 2024. – URL: <https://lezgigazet.ru/archives/137224> (access date: 18/04/2024).
3. Dagestan branch of PJSC RusHydro - the history of hydropower in Dagestan in facts and figures. - URL: <http://www.dagestan.rushydro.ru/hpp/hpp-history/> (access date: 18/04/2024).
4. Alibekov A.B. The history of power engineering in Dagestan at the turn of the 20th–21st centuries. Novoye delo [New Business]: Newspaper, December 19, 2022 (in Russian).
5. Federal State Statistics Service.- URL: <https://rosstat.gov.ru/> (access date: 18/04/2024).
6. Bezrukikh P.P. Vetroenergetika [Wind Power Engineering]. Manual. Moscow, Energiya Publ. House, 2010, 320 p. (in Russian)
7. Isroilov B.I., Sutaev M.M., Mingaleeva R.D., Bessel V.V. Assessment of the potential of wind and solar power in Russia and China. Trudy Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2022, no.3, pp.124–139 (in Russian).
8. Mingaleeva R.D., Bessel V.V. Methodology for estimating the total capacity of a wind power plant. Territoriya Neftegaz [Neftegaz Territory], 2014, no.9, pp. 84–88.
9. Martynov V.G., Bessel V.V., Kucherov V.G., Lopatin A.S., Mingaleeva R.D. Natural gas – the basis of sustainable development of world power engineering: Monograph. M.: Gubkin NRU Publ. 2021.173 p. (in Russian).
10. Development of renewable energy in Russia: technology and economics: Textbook. Ed. A.B. Chubais, V.A. Zubakina, A.E. Kopylova. Moscow, Tochka Publ. Group, 2020. 464 p. (in Russian).
11. Elistratov V.V. Renewable energy. 3rd ed., add. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2016. 424 p. (in Russian).
12. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Volume Two. Wind Energy. Elsevier Ltd – 2012. P.746.
13. Alkhasov A.B., Chernyavsky A.A., Badavov G.B., Aliev R.M., Ninalalov S.A. On the creation of a center for scientific and technological monitoring of the potential of renewable energy sources in the Republic of Dagestan // Renewable energy: problems and prospects: Proceedings of the V International Conference, October 23-26, 2017 Vol.1. Makhachkala: ALEF, 2017. pp. 99-197 (in Russian);

14. Abdurakhmanov G.M., Alkhasov A.B., Akhmedova L.Sh., Gasanov Sh.Sh., Murzakanova L.Z. Potential and prospects for greening energy consumption in Dagestan // South of Russia: ecology, development. No. 1, 2011. P. 131 – 138.
15. Kilinkarova S.G., Gladkova N.V. Analysis of the structure of electricity consumption in regions of intensive development // Izvestia of USUE 1 (51) 2014. P. 55 – 61.
16. Alkhasov A.B., Badavov G.B., Belan S.I., Ninalalov S.A. Issues of the republican target program "use of renewable energy sources in the Republic of Dagestan" Regional problems of economic transformation, No. 9, 2015. P. 36 - 42.
17. BP Statistical Review of World Energy. – 2022 [Electronic resource]. – Access mode: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf;
18. Kamilova A.M. Study of wind activity in Dagestan using geoinformation modeling // "Current issues of renewable energy resources development". Proceedings of the III School of Young Scientists named after E.E. Shpilrain: to the 30th anniversary of the Institute of Geothermy Problems of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences / Ed. by Dr. of Engineering Sciences Alkhasov A.B. Makhachkala. 2010. Pp. 162-166.

Assessment of the potential for the use of wind and solar energy in the Republic of Dagestan

^{1,1} Sutaev Mansur, ^{1,2} Aliev Rasul, ^{2,3} Badavov Hasan, ^{1,4} Samedova Nailya, ^{1,5} Davudov Ibragim, ^{3,6} Svetlichnaya Tatyana

¹ Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia,

² Institute of Geothermal and Renewable Energy Problems, Branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia,

³ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the current state of the energy system in the Republic of Dagestan, identifying key issues related to energy production, distribution, and consumption. It examines the shortages of energy resources and analyzes the condition of the power grid infrastructure. To address the issue of energy deficit, an innovative approach based on the implementation of wind and solar energy is proposed. The analysis demonstrates the significant potential of these renewable energy sources in the Republic of Dagestan, taking into account its unique geographical location and natural-climatic characteristics.

Keywords: renewable energy sources, RES potentials, energy problems of Dagestan, energy consumption, wind energy, solar energy

УДК 551.513.2

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-69-82

EDN: RCSCAN

Солнечная радиация и пространственные особенности общей циркуляции атмосферы

Фёдоров Валерий Михайлович ^[0000-0003-2305-7408]

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

E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Аннотация. Показаны пространственные соответствия в широтной локализации особенностей общей циркуляции атмосферы: средних положений экваториальной депрессии, субтропических зон высокого и субполярных зон низкого давления, полярных фронтов, умеренных и тропических воздушных масс и интенсивности годового и сезонного облучения Земли на верхней поверхности атмосферы (ВГА) и их меридиональных градиентов. Причины отмеченных широтных соответствий связаны с особенностями в облучении Земли, определяемыми ее формой, наклоном оси ее вращения и орбитальным движением вокруг Солнца.

Ключевые слова: общая циркуляция атмосферы, солнечная радиация, экваториальная депрессия, полярные фронты, зоны высокого и низкого давления, циркуляционные ячейки, географические соответствия

1 Введение

Солнце является основным источником энергии атмосферных процессов. Приходящая к Земле солнечная радиация определяет зональность в распределении среднеширотных температур как в приземном слое атмосферы, так и в поверхностном слое океана. Пространственная и временная неоднородность в распределении приходящей радиации является основной причиной циркуляционных процессов в атмосфере и особенностей общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Важнейшей особенностью ОЦА является широтная локализация климатологических полярных фронтов (разделяющих умеренные и тропические воздушные массы), экваториальной депрессии (и внутритропической зоны конвергенции – ВЗК), субтропических зон высокого и субполярных зон низкого давления [1–7].

2 Методика расчёта облучения Земли

Инсоляция Земли (интенсивность облучения, Вт/м²) рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-441, NASA) [8] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале от 10000 лет до н.э. по 10000 лет 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 (м²), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой 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 (Вт/м²), 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 – Total Solar Irradiance) принималось равным 1361 Вт/м² [9]. Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) солнечной энергии изложена в [10].

На основе полученных данных были определены характеристики годовой, сезонной (по полугодиям) и межгодовой изменчивости приходящей на эллипсоид Земли в отсутствие атмосферы солнечной радиации по 5-градусным широтным зонам. Сравнение распределения приходящей солнечной радиации с широтной локализацией основных особенностей общей циркуляции атмосферы позволило выявить некоторые широтные соответствия между ними.

3 Годовая интенсивность облучения Земли

Максимальные значения в осредненном по 5-градусным широтным зонам распределении годовой интенсивности облучения (ИО) Земли (без учета атмосферы) характерны для экваториальных зон каждого полушария (00°–05°), где они в среднем составляют 414,895 Вт/м² (рис. 1).



Рис. 1. Зонально осредненное распределение годовой ИО

Минимальные средние значения годовой ИО отмечаются в полярных широтных зонах (85°–90°) – 174, 089 Вт/м². Средняя для широтной зоны величина годовой ИО составляет 298,738 Вт/м². Полученным характером распределения годовой ИО определяется симметрия средней структуры атмосферы (осредненный меридиональный разрез) относительно экваториальной плоскости [11]. Сезонная и межгодовая изменчивость существенно изменяют полученную картину годового распределения. Характер распределения годовой ИО относительно ее средне зонального значения (298,738 Вт/м²) представлен на рис. 2.



Рис. 2. Средняя аномалия годовой ИО

Из полученного распределения видно, что от широтных зон (45° – 50°) в каждом полушарии к полюсам отмечаются отрицательные отклонения годовой ИО (области стока радиационного тепла). В широтном диапазоне от 40° – 45° с.ш – до 40° – 45° ю.ш. (область источник радиационного тепла) – положительные отклонения от среднего (аномалии). Характер распределения годовой интенсивности облучения Земли на ВГА определяет географическое положение глобальных источников и стоков радиационного тепла [12]. Отражением полученного характера распределения приходящей радиации относительно среднего значения является распределение средне зонального потока энергии в атмосфере [7, 13, 14].

Из приведенных графиков (рис. 1 и 2) следует, что максимальные значения годовой ИО приходятся на широтный диапазон от 5° с.ш. до 5° ю.ш. Известно, что с этим широтным диапазоном связано среднее положение экваториальной депрессии и ВЗК.

В зонах 45° – 50° широты в каждом полушарии отмечается смена знака аномалии годовой ИО, т.е. проходит раздел между областью источника и стока радиационного тепла. Приблизительно с этими широтами связана широтная локализация климатологических полярных фронтов (и соответствующих фронтальных зон и струйных течений). Области полярнофронтальных возмущений являются одними из источников генерации энергии атмосферных процессов [3, 11, 15].

На основе среднеширотных значений (рис. 1) были выполнены расчеты меридионального градиента годовой ИО или меридионального градиента инсоляции – МГИ (рис. 3).



Рис. 3. Распределение меридионального градиента годовой интенсивности облучения

Традиционно значения меридиональный градиент инсоляции (МГИ) рассчитывается к Северу [7, 11, 14]. Однако, в действительности радиационное тепло (на ВГА излучением, в природной системе водными течениями и воздушными массами) переносится из области источника тепла (00° – 45°) в области его стока (45° – 90°). В связи с этим МГИ также рассчитывался от экватора. При этом, в каждом полушарии от значения годовой ИО для широтной зоны 00° – 05° вычиталось значение годовой ИО зоны 05° – 10° . Из значений годовой ИО в зоне 05° – 10° вычиталось значение зоны 10° – 15° и т.д. Полученная широтная структура меридионального градиента годовой ИО (и, связанной с ней интенсивностью переноса радиационного тепла) характеризуется наличием двух максимумов в зонах 50° – 55° градусов каждого полушария и трех минимумов. Собственно, максимальный перенос отмечается в каждом полушарии в обширной области от 45° до 60° . Однако, абсолютный максимум отмечается в широтных зонах 50° – 55° каждого полушария. Один минимум локализован в экваториальной области от 5° с.ш. до 5° ю.ш., два других минимума отмечаются в полярных зонах 85° – 90° каждого полушария. При этом уменьшение градиента от максимумов в сторону полюсов происходит более интенсивно, чем уменьшение в направлении от максимумов к экватору. Значение градиента в экваториальной зоне минимумов (5° с.ш. – 5° ю.ш.) составляет $2,871 \text{ Вт/м}^2$. Приблизительно такая же величина МГИ отмечается для около полярных зон (80° – 85°) – $2,839 \text{ Вт/м}^2$. Максимальное значение МГИ (в зонах 50° – 55° широты в каждом полушарии) составляет приблизительно $23,830 \text{ Вт/м}^2$. Следует отметить (рис. 3), что области, в которых значения меридионального градиента годовой ИО превышают приблизительно $18,0 \text{ Вт/м}^2$, соответствуют западному переносу, а области с меньшими значениями – восточному [1, 11, 16].

Сравнение полученного характера распределения меридионального градиента годовой ИО с широтными особенностями ОЦА показывает, что положению максимальных значений годового МГИ соответствует географическая локализация климатологических полярных фронтов. Экваториальная область минимальных значений МГИ совпадает со средним географическим положением экваториальной депрессии и ВЗК (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление пространственной локализации экстремумов интенсивности годового облучения, годового МГИ и структурных элементов ОЦА.

№	Годовая интенсивность облучения, МГИ	Общая циркуляция атмосферы	Географическая широта, град.
1	Максимумы годовой ИО	Экваториальная депрессия, ВЗК	5° с.ш. – 5° ю.ш.
2	Минимумы МГИ	Экваториальная депрессия, ВЗК	5° с.ш. – 5° ю.ш.
3	Максимумы МГИ	Климатологические полярные фронты	50° – 55° с.ш., 50° – 55° ю.ш.

№	Годовая интенсивность облучения, МГИ	Общая циркуляция атмосферы	Географическая широта, град.
4	Положительные аномалии годовой ИО	Тропические воздушные массы	45° с.ш. – 45° ю.ш.
5	Отрицательные аномалии годовой ИО	Полярные и арктические (антарктические) воздушные массы	45°–90° с.ш., 45°–90° ю.ш.

Пространственная локализация структурных элементов ОЦА в табл. 1 – 2 указана по опубликованным данным [1, 4, 11, 15, 16].

Таким образом, причина географической локализации экваториальной депрессии, ВЗК, полярных фронтов, полярных и тропических воздушных масс связана с формой Земли. Этой же причиной определяются и особенности широтного распределения приходящей на верхнюю границу атмосферы за тропический год солнечной радиации. Таким образом, основой отмечаемого широтного соответствия в этом случае является форма облучаемой Солнцем Земли.

4 Сезонная интенсивность облучения Земли

Среди особенностей ОЦА так же выделяются субтропические области высокого и субполярные области низкого давления. Причины образования этих зон связываются с особенностями циклонической деятельности [4, 17, 18, 19]. Считается, что подвижные антициклоны, возникающие на полярном фронте, при движении с запада на восток, смещаются в более низкие широты, где они усиливаются и образуют в каждом полушарии субтропическую зону высокого давления с осью около 35° широты [15–18]. Циклоны, возникающие в тех же средних широтах у восточных берегов материков, при движении к востоку, отклоняются к более высоким широтам и, локализуясь там, образуя в каждом полушарии область низкого давления в зоне 60°–65° градусов широты. Отмеченные траектории движения циклонов и антициклонов объясняются изменением отклоняющей силы (Кориолиса) вращения Земли с широтой. Вывод о том, что движущиеся циклоны вследствие увеличения с широтой параметра Кориолиса получают ускорение в направлении более высоких широт, а антициклоны – к экватору получен Россби [20] и подтвержден дальнейшими исследованиями [3, 15]. В середине прошлого столетия также предпринимались попытки связать локализацию субтропической области высокого давления с радиационным и тепловым балансом атмосферы на основе анализа карт радиационного баланса и движения воздуха на высотах [21]. Существуют представления, что субтропические области высокого давления связаны с динамикой воздушных масс в ячейках Хэдли. В экваториальной области при нагревании воздушных масс в них развивается конвекция в результате которой воздух в этой области поднимается и в высоких слоях движется от экватора в сторону субтропиков. Движущиеся воздушные массы постепенно

охлаждаются. В области около 35° широты происходит их нисходящее движение, в результате чего атмосферное давление здесь возрастает.

Однако, как будет показано ниже, причины географической локализации зон высокого и низкого давления могут иметь более сложную физическую природу, связанную главным образом с особенностями сезонного распределения интенсивности приходящей солнечной радиации. Рассчитанные значения интенсивности сезонного облучения Земли на ВГА представлены на рис. 4.

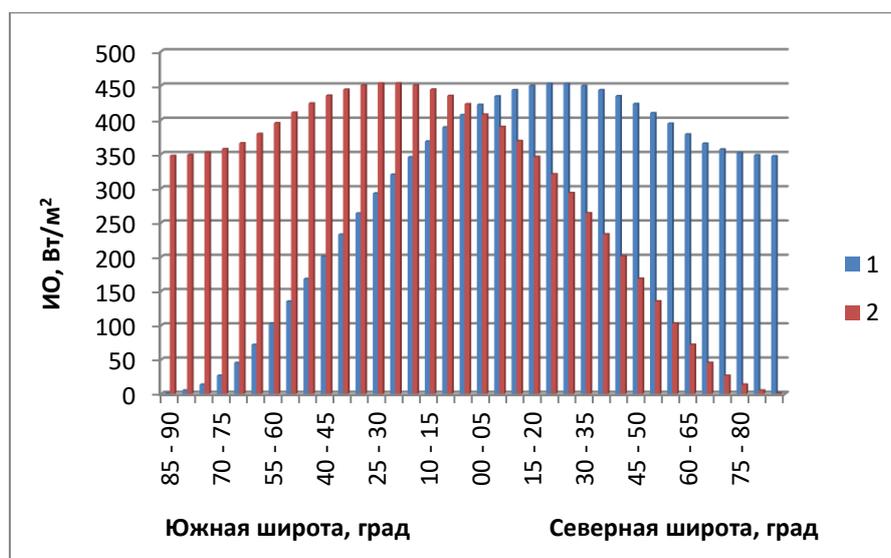


Рис. 4. Сезонная интенсивность облучения Земли (1 – первое астрономическое полугодие, летнее в Северном полушарии, 2 – второе астрономическое полугодие, зимнее в Северном полушарии)

Максимальное значение интенсивности облучения (ИО) в первое астрономическое полугодие (летнее в Северном полушарии) отмечается в широтной области 20° – 30° с.ш. (в среднем $452,622 \text{ Вт/м}^2$). Максимальная ИО во второе астрономическое полугодие (зимнее полугодие в Северном полушарии) характерна для широтной области 20° – 30° ю.ш. (в среднем, $453,384 \text{ Вт/м}^2$). По полученным значениям среднеширотного сезонного облучения рассчитывались аномалии сезонной ИО (отклонения от среднего для 5-ти градусной широтной зоны значения соответствующей сезонной интенсивности облучения) (рис. 5).

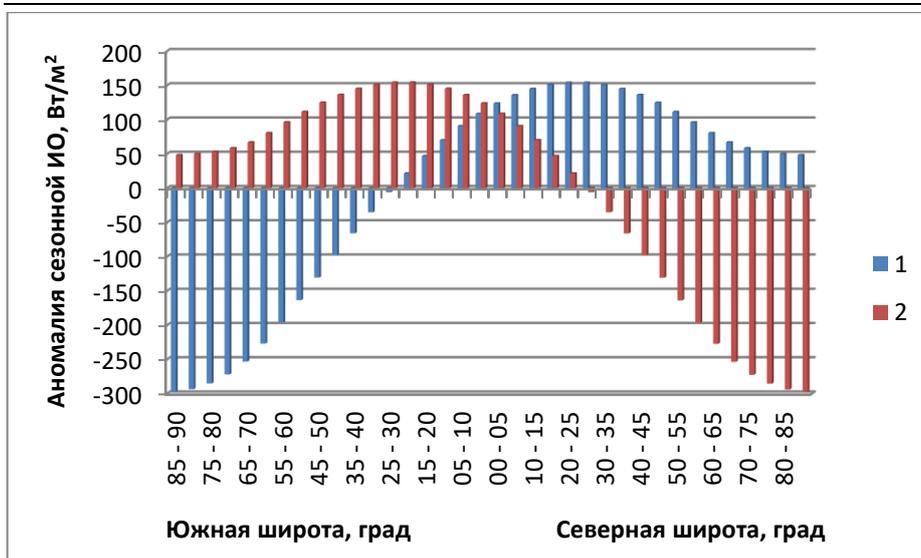


Рис. 5. Аномалия сезонной ИО (1 – первое астрономическое полугодие, летнее в Северном полушарии, 2 – второе астрономическое полугодие, зимнее в Северном полушарии)

В первое астрономическое полугодие (летнее в Северном полушарии) отрицательные значения характерны для зоны 25° – 30° ю.ш. и более высоких широтных зон Южного полушария. В области 20° – 25° ю.ш. и во всех зонах севернее нее отмечаются положительные значения аномалии сезонной ИО (летней в Северном полушарии). Максимальные значения аномалии летней (в Северном полушарии) ИО (в среднем, $154,064 \text{ Вт/м}^2$) отмечаются в широтной области 20° – 30° с.ш. Во второе астрономическое полугодие отмечается зеркальное, относительно экватора, широтное распределение ИО (зимней в Северном полушарии). В широтной зоне 25° – 30° с.ш., и севернее нее отмечаются отрицательные аномалии ИО. В широтной зоне 20° – 25° с.ш. и южнее нее аномалии ИО (зимней в Северном полушарии) имеют положительные значения. Максимальные значения аномалии ИО в это полугодие характерны для области 20° – 30° ю.ш. (в среднем, $154,323 \text{ Вт/м}^2$). То есть, широтные диапазоны 25° – 30° в каждом полушарии отражают сезонную реверсивную смену областей источников и стоков радиационного тепла.

В широтном распределении аномалии сезонных ИО отмечается область положительных значений аномалии ИО в первое и второе астрономическое полугодие (от 20° – 25° с.ш. до 20° – 25° ю.ш.). Этот широтный диапазон приблизительно соответствует географическому положению циркуляционных ячеек Хэдли в полушариях, рассматриваемых как средние циркуляции и представляющих собой сравнительно простые тепловые машины [1, 11, 16]. Полученные широтные соответствия подтверждают, что функционирование этих тепловых машин связано с сезонными изменениями в интенсивности облучения Земли.

По результатам распределения сезонных ИО рассчитывались их меридиональные градиенты (рис. 6). Расчеты проводились последовательным вычитанием значений сезонной ИО от их соответствующих максимумов (20° – 25° и 25° – 30° с.ш. к югу и северу соответственно в первое астрономическое полугодие и 20° – 25° и 25° – 30° ю.ш. к северу и к югу соответственно во второе астрономическое полугодие).

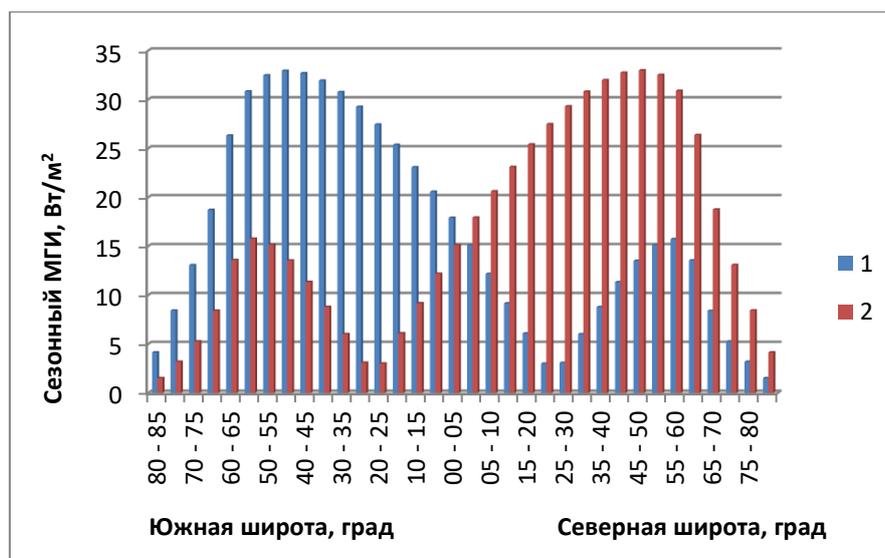


Рис. 6. Распределение сезонного МГИ (1 – первое астрономическое полугодие, летнее в Северном полушарии, 2 – второе астрономическое полугодие, зимнее в Северном полушарии).

В широтном распределении сезонных МГИ отмечаются два максимума. В первое астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии) главный максимум МГИ отмечается в широтной области 40° – 55° ю.ш. (в среднем, $32,704 \text{ Вт/м}^2$). Второй максимум локализуется в широтной области 50° – 60° с.ш. (в среднем $15,448 \text{ Вт/м}^2$). Минимум МГИ в это полугодие приходится на широтную область 20° – 30° с.ш. ($3,052 \text{ Вт/м}^2$). Кроме того, минимумы сезонных МГИ для каждого полугодия отмечаются в полярных районах. Во второе астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии) максимальные значения МГИ отмечаются в широтной области 40° – 55° с.ш. ($32,760 \text{ Вт/м}^2$). Второй максимум приходится на широтную область 50° – 60° ю.ш. ($15,479 \text{ Вт/м}^2$). Минимум МГИ в это полугодие приходится на область 20° – 30° ю.ш. ($3,057 \text{ Вт/м}^2$).

Пространство циркуляционных ячеек Хэдли, таким образом, локализуется в области ограниченной минимумами сезонных МГИ. Эта область также характеризуется восточным переносом воздушных масс (пассаты). Широтные области от минимумов до вторых максимумов сезонных МГИ соответствуют обратным

циркуляционным ячейкам Ферреля в схемах ОЦА [1, 11]. Для этих областей характерен западный перенос воздушных масс. Пространство от главного максимума сезонного МГИ до географического полюса соответствует локализации полярных циркуляционных ячеек в полушариях. Из графика (рис. 6) также видно, что меридиональные градиенты ИО в зимние полугодия в каждом полушарии значительно (почти вдвое) превосходят летние МГИ. Минимумы сезонной МГИ расположены вблизи областей субтропические области высокого давления (маркируют их), главные максимумы сезонных МГИ расположены в зонах развития климатологических полярных фронтов, вторые максимумы сезонных МГИ располагаются на южной периферии области низкого давления в Северном полушарии и на северной периферии в Южном полушарии..

Таким образом, географическая локализация зон высокого и низкого давления, а также климатологических полярных фронтов находится в определенном широтном соответствии со значениями интенсивности сезонного облучения Земли и ее меридионального градиента (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление пространственной локализации экстремумов интенсивности сезонного облучения, сезонных МГИ и структурных элементов ОЦА.

№	Сезонная интенсивность облучения, МГИ	Общая циркуляция атмосферы	Географическая широта, град.
1	Максимумы сезонной ИО, смена знака аномалии сезонной ИО, минимумы сезонных МГИ	Субтропические зоны высокого давления	20–30 с.ш., 20–30 ю.ш.
2	Главные максимумы сезонных МГИ	Климатологические полярные фронты	40–55 с.ш., 40–55 ю.ш.
3	Вторые максимумы сезонных МГИ	Южная (в Северном полушарии) и северная (в Южном полушарии) периферия субполярных зон низкого давления	50–60 с.ш., 50–60 ю.ш.
4	Область от минимума сезонного МГИ до второго максимума	Циркуляционная ячейка Ферреля	30–60 с.ш. 30–60 ю.ш.
5	Область положительных аномалий сезонных ИО (летней и зимней), область от минимума летнего МГИ до минимума зимней МГИ	Циркуляционные ячейки Хэдли	25 с.ш. – 25 ю.ш.
6	Области от главных максимумов сезонных МГИ до полюсов	Полярные циркуляционные ячейки	60–90 с.ш. 60–90 ю.ш.

Одним из факторов отмеченных соответствий в интенсивности сезонного облучения Земли и ее меридиональных градиентов и элементах общей циркуляции атмосферы (табл. 2) является наклон оси вращения Земли, с которым связано изменение интенсивности сезонного облучения Земли. С особенностями широтного распределения зон высокого и низкого атмосферного давления связаны барические градиенты, определяющие преобладающие направления переносов воздушных масс. В области низких широт, ограниченной субтропическими антициклонами преобладает восточный перенос. В области, расположенной между зоной субтропических антициклонов и субполярной зоной низкого давления – западный перенос [1, 4, 11, 16].

5 Заключение

Показаны некоторые пространственные соответствия в характеристиках годового и сезонного облучения Земли и элементов общей циркуляции атмосферы. Проведенный сравнительный анализ показал, что с характеристиками годового облучения связано пять, а сезонного облучения – шесть пространственных соответствий.

Пространственная локализация максимумов годовой интенсивности облучения соответствует положению зоны экваториальной депрессии и внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Также положение зоны экваториальной депрессии и ВЗК совпадает с положением минимумов меридионального градиента годовой интенсивности облучения (МГИ). Максимумы годового МГИ маркируют зону климатологических полярных фронтов (отделяющих тропические воздушные массы от умеренных). Тропические воздушные массы располагаются в областях с положительными аномалиями годового облучения, а полярные (арктические и антарктические) воздушные массы – в областях отрицательных аномалий годовой ИО.

Максимумам сезонной интенсивности облучения (летней и зимней), смене знака аномалии сезонной ИО, минимумам сезонных МГИ соответствует положение субтропических областей высокого давления. Главные максимумы меридиональных градиентов сезонного облучения Земли маркируют положение климатологических полярных фронтов в полушариях. Южная периферия субполярных зон низкого давления в Северном полушарии и северная периферия в Южном полушарии совпадает с положением вторых максимумов сезонных МГИ. Также характеристиками сезонного облучения маркируются все циркуляционные ячейки ОЦА. Циркуляционные ячейки Ферелля располагаются в полушариях в области от минимума сезонного МГИ до второго максимума. Циркуляционные ячейки Хэдли локализуются в области положительных аномалий летней и зимней ИО, области от минимума летнего МГИ до минимума зимнего МГИ. Полярные циркуляционные ячейки располагаются в широтной области от главных максимумов сезонных МГИ до полюсов

Поскольку проходящая солнечная радиация является основным источником энергии циркуляционных процессов в атмосфере, то особенности ОЦА могут

определяться характером интенсивности приходящей солнечной радиации, ее пространственной и временной неоднородностью (наряду с изменением скорости вращения Земли, силы Кориолиса и другими факторами). Отражением этого, являются некоторые широтные соответствия характеристик интенсивности годового и сезонного облучения Земли и локализации элементов ОЦА.

Литература

1. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 260 с.
2. Мониин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 246 с.
3. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М.: МГУ, 1986. 328 с.
4. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2006. – 582 с.
5. Федоров В.М. Астрономическая климатология. М.: Московский университет, 2002. 236 с.
6. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М.: Физматлит, 2011. 376 с.
7. Федоров В.М. Проблемы параметризации радиационного блока физико-математических моделей климата и возможности их решения // Успехи физических наук, 2019. Т. 193. № 9. С. 971 – 988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339
8. <http://www.ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.
9. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophysical Research Letters, 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777.
10. 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.
11. Пальмен Э. Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 616 с.
12. Будыко М.И. Изменение климата. Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 280 с.
13. Манабе С., Смагоринский Дж., Стриклер Р.Ф. Численное моделирование средней картины общей циркуляции атмосферы с учетом процессов влагообмена / Теория климата. Ред. Л.С. Гандин. А.С.Дубов, М.Е.Швец. Л.: Гидрометеоздат, 1967. С. 185–229.
14. Оорт А.Х. Балансовые соотношения в земной климатической системе / Динамика климата. Ред. С. Манабе. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 91–113.
15. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1959. 260 с.
16. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т.1. 400 с. Т.2. 415 с.
17. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы Л.: Гидрометеоздат, 1960. 270 с.
18. Хромов С.П. Метеорология и климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 492 с.
19. Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный В.П. Климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 568 с.

20. Rossby C.G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacement of the semi-permanent centers of action // *J. Marine Res.*, 1939. V. 2. № 1. P. 38–55.
21. Усманов Р.Ф. О причинах формирования планетарной фронтальной зоны и субтропической полосы высокого давления // *Метеорология и гидрология*, 1953. № 3. С. 41–45.

References

1. Lorenc E".N. Priroda i teoriya obshhej cirkulyacii atmosfery. L. Gidrometeoizdat 1970. 260 s.
2. Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata. L. Gidrometeoizdat 1982. 246 s.
3. Xrgjan A.X. Fizika atmosfery. M. MGU 1986. 328 s.
4. Xromov S.P. Petrosyanc M.A. Meteorologiya i klimatologiya. M. MGU 2006. – 582 s.
5. Fedorov V.M. Astronomicheskaya klimatologiya. M. Moskovskij universitet 2002. 236 s.
6. Fedorov V.M. Dinamika balansa massy lednikov v svyazi s makrocirkulyacionnymi processami v atmosfere. M. Fizmatlit 2011. 376 s.
7. Fedorov V.M. Problemy parametrizacii radiacionnogo bloka fiziko-matematicheskix modelej klimata i vozmozhnosti ix resheniya *Uspexi fizicheskix nauk* 2019. T. 193. 9. S. 971 – 988. DOI 10.3367/UFNr.2023.03.039339
8. <http://www.ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). E"lektronnyj resurs nacionalnogo aero-kosmicheskogo agentstva SShA.
9. Kopp G. Lean J. A new lower value of total solar irradiance Evidence and climate significance *Geophysical Research Letters* 2011. V. 37. L01706. DOI 10.1029/2010GL045777.
10. Fedorov V.M. Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 *Springer Geology* 2020. V. 1. P. 181–192. DOI10.1007/978-3-030-38177-6_20.
11. Palmen E". Nyuton Ch. Cirkulyacionnye sistemy atmosfery. L. Gidrometeoizdat 1973. 616 s.
12. Budyko M.I. Izmenenie klimata. L. Gidrometeoizdat 1974. – 280 s.
13. Manabe S. Smagorinskij Dzh. Strikler R.F. Chislennoe modelirovanie srednej kar-tiny obshhej cirkulyacii atmosfery s uchedom processov vlagoobmena *Teoriya klima-ta*. Red. L.S. Gandin. A.S.Dubov M.E.Shvec. L. Gidrometeoizdat 1967. S. 185–229.
14. Oort A.X. Balansovye sootnosheniya v zemnoj klimaticheskoy sisteme *Dinamika klimata*. Red. S. Manabe. L. Gidrometeoizdat 1988. S. 91–113.
15. Pogosyan X.P. Obshhaya cirkulyacii atmosfery. L. Gidrometeoizdat 1959. 260 s.
16. Gill A. *Dinamika atmosfery i okeana*. M. Mir 1986. T.1. 400 s. T.2. 415 s.
17. Kac A.L. Sezonnnye izmeneniya obshhej cirkulyacii atmosfery i dolgosrochnye progno-zy L. Gidrometeoizdat 1960. 270 s.
18. Xromov S.P. Meteorologiya i klimatologiya. L. Gidrometeoizdat 1968. 492 s.
19. Drozdov O.A. Vasilev N.V. Raevskij A.N. Smekalova L.K. Shkolnyj V.P. *Kli-matologiya*. L. Gidrometeoizdat 1989. 568 s.
20. Rossby C.G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacement of the semi-permanent centers of action *J. Marine Res.* 1939. V. 2. 1. P. 38–55.
21. Usmanov R.F. O prichinax formirovaniya planetarnoj frontalnoj zony i subtropi-cheskoj polosy vysokogo davleniya *Meteorologiya i gidrologiya* 1953. 3. S. 41–45.

Solar Radiation and Spatial Peculiarities of the General Circulation of the Atmosphere

Fedorov Valery

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Abstract. The article shows spatial correspondences in the latitudinal localization of the features of the general atmospheric circulation: the average positions of the equatorial depression, subtropical zones of high and subpolar zones of low pressure, polar fronts, moderate and tropical air masses and the intensity of annual and seasonal irradiation of the Earth on the upper surface of the atmosphere (HAA) and their meridional gradients. The reasons for the noted latitudinal correspondences are related to the peculiarities in the irradiation of the Earth, determined by its shape, the tilt of its axis of rotation and the orbital motion around the Sun.

Keywords: general atmospheric circulation, solar radiation, equatorial depression, polar fronts, high and low pressure zones, circulation cells, geographical correspondences.

УДК 621.3:621.22:620.91

DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-83-95

EDN: UZCGGW

Ветроэнергетическая установка с жёсткими парусами: прямое измерение сил, действующих на платформу

^{1,1} Чекарев Константин Владимирович [0000-0002-5140-5142],^{1,2} Залиханов Алим Михайлович [0000-0002-2540-6045]¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РоссияE-mail: ¹konstantintchekarev@yandex.ru, ²bulungu@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 платформ с установленными на них парусами. С целью повышения эффективности преобразования ветрового потока была разработана система жестких парусов, которая устанавливалась на макет платформы. Для проведения исследований с такой системой парусов был разработан и создан генератор ветрового потока, обеспечивающий необходимое распределение скоростей в вертикальной плоскости. Проведены эксперименты по прямому измерению сил, действующих на платформу с системой жестких парусов. Проведено сравнение полученных величин с расчетными, найденными по усовершенствованной методике определения величины сил по величине скорости платформы при её движении с грузами разного веса. Результаты проведенных исследований представлены в данной статье.

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

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 в Древнем Египте, Китае и др. [1], но это направление развития не получило. В настоящее время перемещение объектов по земле с помощью парусов осуществляется только в спортивных целях. Создана ассоциация World Sailing, которая проводит соревнования сухопутных парусных яхт, фиксирует рекорды скорости парусных болидов [2,3].

С появлением зеленой энергетики установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали использоваться для производства электроэнергии. Они устанавливаются на суше, вблизи морского берега и на море. Ветроэнергетика является одной из самых быстроразвивающихся отраслей возобновляемой энергетики. В отчете The Global Wind Report 2022 год отмечается, что по суммарной введенной мощности 2021 был рекордным в глобальной ветроэнергетике – 94 ГВт [4]. В большинстве действующих ветровых установках преобразование энергии ветрового потока в электричество осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на мачте. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующий грунт, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки. Однако существует много областей с высоким ветровым потенциалом, в которых, из-за свойств грунтов, сооружать такие установки либо нельзя, либо экономически нецелесообразно. Одним из вариантов решения задачи использования ветроэнергетических установок в таких областях могут быть парусные энергетические установки наземного базирования.

2 Актуальность исследования и постановка цели

Предлагаются варианты парусных энергетических установок наземного базирования, позволяющих снять проблему больших размеров преобразователя энергии ветрового потока. Известен вариант конструкции парусной энергетической установки наземного базирования, содержащей платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по радиальному рельсовому пути [5]. 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. Недостатком предлагаемой конструкции является то, что она может работать только при большом диаметре рельсового пути поскольку при малых диаметрах навстречные паруса будут перекрывать расположенные за ними паруса, 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. Предложен вариант парусной энергетической установки, в которой платформы движутся циклично в заданном интервале перемещений [6]. Чтобы обеспечить такое движение в состав установки включена система изменения положения парусов и система управления движением платформ. Была создана экспериментальная установка для проведения исследований на макетах парусных платформ. Целью исследований было проверка функционирования входящих в установку элементов и разработка методик определения их технических характеристик. Экспериментальные исследования, результаты которых изложены в статье [6], показали работоспособность входящих в неё элементов, однако некоторые из них требуют усовершенствования. Например, входящий в состав экспериментальной установки генератор воздушного потока обеспечивает равномерность распределения скоростей по горизонтали, но имеет большую неравномерность по вертикали. В ходе проведения экспериментов отработывались методики измерения параметров, определяющих эффективность её работы. При движении платформы на неё действуют три силы: аэродинамическая сила ветрового потока, действующая на паруса, сила трения колес и сила сопротивления, действующая на паруса в результате собственного движения платформы. Были разработаны методики определения величины этих сил путем нахождения скорости платформы при её движении с грузами разного веса [7]. Проведено исследование по увеличению мощности установки за счет организации движения платформ по двум соседним путям, при этом использовалась система управления положением парусов через контактный рельс, моделирующая управление по сигналам GPS [9].

В процессе проведения экспериментов по определению величины действующих на платформу сил, выяснилось, что для получения точных значений, 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. Были созданы две эстакады, на которых были проведены эксперименты по определению коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока, включавшие метод измерения скоростей платформ с грузами разного веса [8]. В дополнении к этому был разработан метод прямого измерения величины силы воздействия ветрового потока на паруса платформы [9]. С целью поиска вариантов увеличения эффективности ветроэнергетической установки наземного базирования, была разработана система жестких парусов, выполненная в виде вертикальной рамки, в которой вставлялся набор из 3-х, 4-х и 5-и жестких пластин. Известно, что устанавливаемые на морских судах жесткие паруса с изменяемым профилем крыла являются более эффективными по сравнению с традиционными парусами [10]. Паруса такого типа был установлен на сухопутных яхтах для достижения рекордных

скоростей в 209 км/ час и 222 км/час [11]. Последний рекорд был поставлен в декабре 2022 года чемпионом яхтенной гонки Кубок Америки 2021 года [12]. С разработанной системой жестких парусов проведены эксперименты по проверке функционирования систем экспериментальной установки и по определению величины скорости платформы при её движении со всеми вариантами системы жестких парусов [13]. Для дальнейшего совершенствования предложенной системы жестких парусов необходимо получить её точные характеристики, в частности, найти величину сил, действующих на платформу с такой системой жестких парусов. Это являлось задачей исследований, результаты которых представлены в данной статье.

3 Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

В экспериментальной установке, на которой, которые проводились исследования, были использованы следующие элементы: генератор ветрового потока (ГВП), макет платформы, на которой была установлена система жестких парусов и установленную на эстакаде направляющую систему. Изображение генератора ветрового потока и эстакады представлено на рис.1.



Рис. 1. Генератор ветрового потока и эстакады для движения платформ

Поверхности для движения платформы по эстакаде были выполнены из пластиковых прямоугольных профилей сечением 25x16 мм, расположенных на расстоянии 145 мм друг от друга и отстоящих от горизонтальной плоскости на расстоянии 160 мм. В середине эстакады был расположен направляющий рельс, выполненный из пластикового профиля сечением 12x12 мм, на котором была нанесена разметка с интервалом 10 см. Направляющий рельс эстакады отстоял от генератора ветрового потока на расстояниях 50. Генератор ветрового потока (ГВП) был выполнен в виде двух рядов вытяжных вентиляторов в количестве

13 и 12 штук в нижнем и верхнем ряду соответственно. Вентиляторы были расположены рядом друг с другом на рейках длиной 2 метра, разнесённых по вертикали на 8 см. Рейки крепились на двух стойках, высота которых подбиралась экспериментально таким образом, чтобы паруса оказывались в области равномерного распределения скоростей в вертикальной плоскости. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальной плоскости представлен на зис.2.

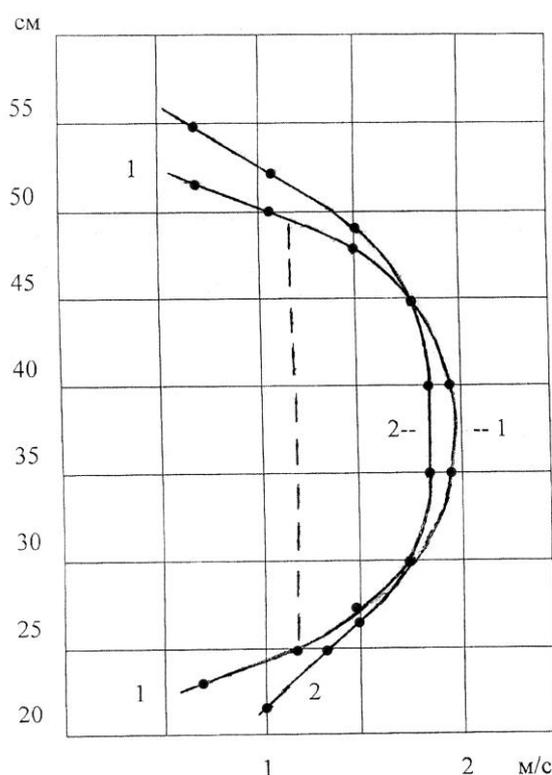


Рис. 2. Распределение скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от генератора ветрового потока на расстояниях 50 и 70 см. (графики на рисунке: 1 – 50 см; 2 – 70 см; пунктирная линия - положение пластин системы жестких парусов.

Экспериментальные исследования проводились на макете платформы из предыдущих серий экспериментов, на котором была установлена система жестких парусов. Изображение макета платформы с системой жестких парусов представлено на Рис. 3. К рамке основания платформы, выполненной в виде прямоугольника размером 22 см x 17 см, крепились 4 пластмассовых колеса диаметром 40 мм. В середине платформы, на высоте 30 мм от основания, крепилась рейка длиной 24 см, на которой устанавливалась система жестких парусов, выполненная в виде двух вертикальных, пластиковых трубок диаметром 5 мм и

высотой 30 см, отстоящих друг от друга на расстоянии 22 см, к которым крепились прямоугольная рамка шириной 22 см и высотой 26 см, сделанная из тонкого пластикового уголка размером 6х6 мм. Нижняя сторона рамки находилась на расстоянии 10 см от поверхности, по которой двигалась платформа. В рамку, в зависимости от задачи эксперимента, вставлялся набор из 3-х, 4-х или 5 жестких полос высотой 25,5 см. В наборе из 3-х полос их ширина составляла 10 см, в наборе из 4-х полос - 8 см, а в наборе из 5 полос - 6 см. Полосы вырезались из листа пенополистирола толщиной 3 мм. Полосы крепились к нижней и верхней стороне рамки так, чтобы они могли поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через середину полос.

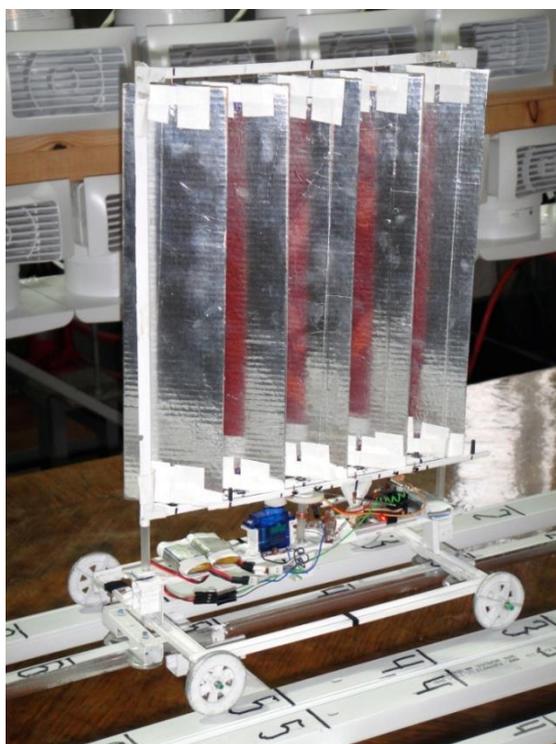


Рис. 3. Макет платформы с системой жестких парусов.

Траектория движения платформы задавалась направляющей системой, которая включала расположенный на середине эстакады направляющий рельс и 4 колеса диаметром 15 мм, закрепленных по 2 на коротких сторонах рамки основания платформы, на их нижней стороне. Оси этих направляющих колес были направлены вертикально, расстояние между колес в каждой паре было 32 мм и они были установлены так, чтобы направляющий рельс находился между ними. При таком расположении колес платформа свободно перемещалась вдоль направляющего рельса.

При проведении экспериментов движение платформы снималось на видеосъемку. По полученным записям строились графики перемещения платформы в зависимости от времени, по которым определялась скорость её движения.

4 Результаты экспериментов и обсуждение

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии проводилось прямое измерение сил, действующих на платформу с системой жестких парусов по методике, описанной в статье [9].

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе измерялся коэффициент трения при движении платформы с грузами 1 разного веса. Для этого к рамке основания платформы крепилась перекинутая через блок нить с подвешенным на другом конце грузом 2 в виде кусочка пластилина. При выключенном ГВП вес кусочка пластилина подбирался таким образом, чтобы платформа начинала медленно двигаться по эстакаде с постоянной скоростью. По полученным значениям веса кусочка пластилина и весу платформы с грузом определялась величина коэффициента трения. Для всех значений веса груза 1 коэффициент трения оказался равным $k_T = 0,024$, что позволяет определять действующую на платформу силу трения при любом её весе.

На втором этапе экспериментов осуществлялось прямое измерение силы, действующей на платформу с системой жестких парусов. Для этого платформа ставилась на эстакаду, отстоящую от ГВП на расстоянии 50 см, затем к ней прикреплялась перекинутая через блок нить с грузом на другом конце, и включался ГВП. В процессе нескольких ручных пусков подбирался такой вес пластилинового груза, чтобы платформа под действием ветрового потока медленно двигалась с постоянной скоростью. В этом случае выполняется соотношение для сил, действующих на платформу:

$$F + F_T + F_c = 0 \quad (1)$$

где F – сила ветрового потока, действующая на пластины системы жестких парусов, F_T – сила трения, а F_c – сила сопротивления воздуха, действующая на пластины при движении платформы.

Из равенства (1) следует, что величина аэродинамической силы F , действующей на полосы системы жестких парусов, численно равна сумме сил трения F_T и силы сопротивления F_c

$$F = F_T + F_c \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что разность сил $F - F_T$ численно равна силе сопротивления

$$F - F_T = F_c$$

В табл. 1 представлены значения величины силы, действующей на платформу с системой жестких парусов с набором из 3-х, 4-х и 5-и полос при её движении по эстакаде, отстоящей от ГВП на расстоянии 50см.

Таблица 1. Значения величины силы, действующей на платформу с системой жестких парусов с набором из 3-х, 4-х и 5-и полос при её движении по эстакаде, отстоящей от ГВП на расстоянии 50 см.

количество полос	3	4	5
величина сил, Н			
$F - F_T$	0,059	0,059	0,058
F_T	0,047	0,047	0,047
F	0,106	0,106	0,105

Для сравнения величины сил, полученных прямым измерением, с величинами сил, полученных методом определения скоростей платформы при её движении с грузами разного веса, была проведена серия экспериментов с движением платформы с системой парусов с набором из 3-х, 4-х и 5-и полос. Платформа двигались по эстакаде, отстоящей от ГВП на расстоянии 50 см, с грузами в диапазоне веса 0-150 г. На Рис. 4 представлен график перемещения платформы с системой жестких парусов из 4-х полос без груза. Как видно из рисунка, на временном отрезке 1,4 с от начала движения скорость платформы увеличивается, а затем она начинает двигаться равномерно со скоростью $V = 61 \text{ см/с}$.

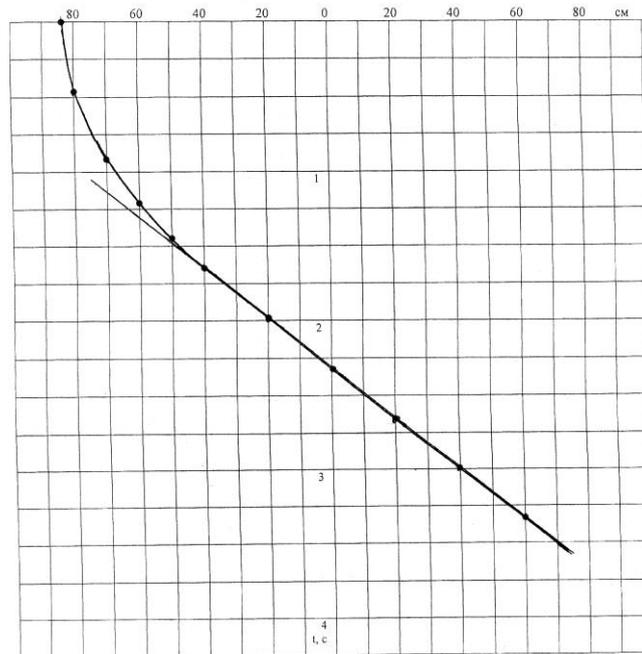


Рис. 4. График временной зависимости перемещений платформы с парусной системой из 4 полос без груза (ось x – расстояние по эстакаде, см; ось y – время, с).

В таблице 2 представлены значения величин скоростей платформы с системой жестких парусов с набором их 3-х, 4-х и 5-и полос при её движении с грузами разного веса по эстакаде, отстоящей от ГВП на расстоянии 50 см.

Таблица 2. Значения величин скорости платформы с системой жестких парусов с набором из 3-х, 4-х и 5-и полос при её движении с грузами разного веса по эстакаде, отстоящей от ГВП на расстоянии 50 см.

Расстояние от ГВП 50, см	вес груза, г		0	50	100	150
	количество	полос				
скорость платформы, см/с	3		70,1	61,2	52,6	43,2
	4		61,1	53,5	46,0	38,3
	5		59,3	51,5	45,0	37,5

Значения скоростей, приведенные в Таблице 2, представлены на Рис. 5 в виде графика зависимости скорости платформы от величины груза. Вычисление величины сил действующих на платформу по данным, представленным в Таблице 2, осуществлялось следующим образом:

выражение (1) можно представить в виде выражения:

$$F = k_T(M + m)g + k_c V^2 \quad (3)$$

где: M – масса платформы, равная $M = 195$ г, m – масса груза 1, а k_c – коэффициент сопротивления, g – ускорение свободного падения, $9,8$ м/с².

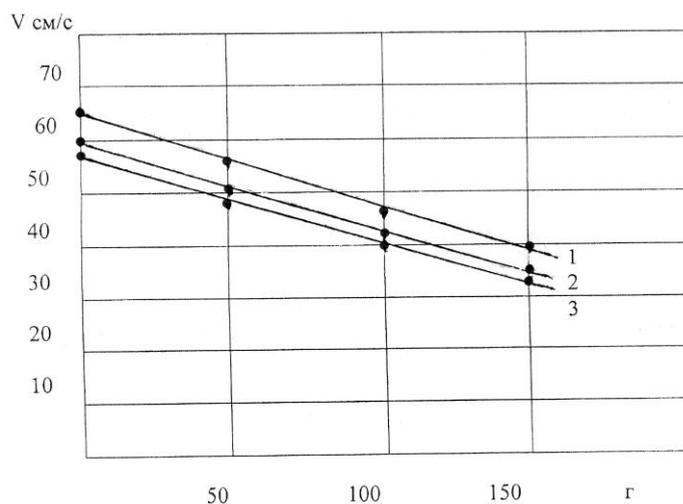


Рис. 5. График зависимости скорости платформы от величины груза при движении по эстакадам, отстоящим от генератора ветрового потока на расстоянии 50

см (на графике: 1 – платформа с парусной системой из 3 полос; 2 – платформа с парусной системой из 4 полос; 3 – платформа с парусной системой из 5 полос).

В выражении (3) при движении платформы постоянной остается только сила трения, но для двух близких грузов массами m_1 и m_2 величины сил F_1 и F_2 можно считать равными. В этом случае можно написать соотношение:

$$k_T(m_2 - m_1)g = k_c(V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

$$k_c = k_T \Delta mg / \Delta V^2 \quad (5)$$

Прямое измерение сил производилось при малых скоростях платформы. Зависимость скорости платформы от веса груза, представленную в виде графика на рис. 4, следует представить в виде уравнений, а значения скоростей платформы с грузами следует брать из этих уравнений. Например, зависимость скоростей платформы с системой парусов из 3-полос от веса груза можно представить в виде уравнения

$$V = 0,70 \frac{m}{c} - 0,18 \frac{c}{g} \times 100 \text{ г} \times 9,8 \text{ м/с}^2 \quad (6)$$

Скорость для платформ с грузом 100 г, найденная из уравнения (6), будет равна $V_1 = 52$ см/с, а скорость для платформы с грузом 150 г равна $V_2 = 43$ см/с. Подставляя разницу квадратов этих скоростей и разницу грузов, равную 50 г, в выражение (5) получим значение $k_c = 0,00140$ г $\text{с}^2/\text{см}^2$. С учетом того, что масса платформы равна 195 г, подставляя в выражение (3) соответствующие значения, для платформы с системой жестких парусов из 3-х полос получаем значение силы $F = 0,108$ Н, что практически совпадает со значением $F = 0,106$ Н, полученным прямым измерением. В таблице 3 приведены величины силы ветрового воздействия, полученные прямым измерением в первой серии экспериментов, и расчетные значения величины силы, полученные во второй серии экспериментов для системы парусов из 3-х, 4-х и 5-и полос.

Таблица 3. Значения величины силы ветрового воздействия, действующей на систему жестких парусов из 3-х, 4-х и 5-и полос, полученные прямым измерением и расчетные величины силы, Н.

способ определения	количество полос		
	3	4	5
измерения	0,106	0,106	0,105
расчет	0,108	0,109	0,109

Как видно из таблицы 3, значения величины силы, действующей на систему жестких парусов из 3-х, 4-х и 5-и полос, полученные прямым измерением, и значения, полученные расчетным способом по величинам скоростей при движении платформы с грузами разной величины, практически совпадают. Это означает, что обе методики равноценные и могут быть использованы для измерения сил, действующих на систему парусов другой конструкции.

Зная величину силы воздушного потока F , действующего на систему жестких парусов, можно определить мощность, развиваемую этой силой и коэффициент

эффективности использования энергии ветрового потока ветроэнергетической установки наземного базирования. Мощность W равна произведению силы F на величину скорости платформы V

$$W = F V \quad (7)$$

Подставляя в выражение (7) соответствующие значения получаем величину мощности

$$W = 0,07 \text{ ватт}$$

Отношение мощности W из (7) и мощности воздушного потока $W_B = 0,160$ ватт дает $K_{\text{эфф}} = 0,44$.

Полученное значение немного выше величины коэффициента эффективности ($k_{\text{эфф}} = 0,43$), которое было получено по результатам экспериментов на нашей парусной установке другой конструкции, описание и расчеты приведены в статье [8].

5 Заключение

Разработанный метод прямого измерения величины сил, действующих на платформу, был использован для измерения величины сил, действующих на платформу с системой жестких парусов. Проведено сравнение полученных значений сил с расчетными величинами, полученные с использованием значений скоростей платформы при её движении с грузами разного веса. Определение величины сил проводилось после уточнения метода их расчета. Сравнение показало, что значения сил, полученные прямым измерением, и расчетные значения практически совпадают. Найденное значение величины аэродинамической силы воздушного потока, действующей на полосы системы жестких парусов, было использовано для определения коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока, величина которого немного выше величины, полученной в предыдущих экспериментах с другими системой парусов и генератором ветрового потока.

Литература

1. Дигаи П. Yacht Russia, № 8 (77), 2015 г. Под парусами по рельсам. https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html
2. Всемирная парусная организация // Event Organiser Resource Centre // <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>
3. Харрис М. ISAF меняет название на World Sailing, // SPORTCEL // 8.12.2015 г. // <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Global Wind Report 2021 <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
5. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
6. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования // Окружающая среда и энергосодержание: №2 (14), 2022. С.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>

7. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // *Окружающая среда и энергосодержание*. № 3 (15), 2022, сс. 67-79.
8. Чекарев К.В. и др. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение коэффициента эффективности // *Окружающая среда и энергосодержание*: № 4 (16) 2022. <http://jeees.ru/category/journal/2023-4/>
9. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформу // *Окружающая среда и энергосодержание* // № 2 (18), 2023, сс. 49-61. // <http://jeees.ru/category/journal/2023-2/>
10. Нильсен П. Стали ли вингсьют-парусники мейнстримом? // *Sail*. // 2 августа 2017 г. // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream>
11. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf
12. Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час. // <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm> «Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час».
13. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Ветроэнергетическая установка наземного базирования с жесткими парусами // *Окружающая среда и энергосодержание*. № 1 (21), 2024, с.с. 100-113. <http://jeees.ru/category/journal/2024-1/>

References

1. Digai P. Pod parusami po relsam. // *Yacht Russia*, # 8 (77), 2015 // https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html/
2. World Sailing Organisation // Event Organiser Resource Centre // <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>
3. Harris M. ISAF changes name to World Sailing, // *SPORTCEL* // 8.12.2015 // <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Global Wind Report 2021 <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
5. 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 //
6. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. №2 (14), 2022. pp.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>
7. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: nakhodjenie velichiny sil, deistvuiuschih na platformu // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. №3 (15), 2022. pp.67-79. <http://jeees.ru/category/journal/2022-3/>
8. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: opredelenie koeffitsienta tffektivnosti. // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 4 (16) 2022. <http://jeees.ru/category/journal/2023-4/>
9. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: metod priamogo izmerenia sil, deistvuiushih na na platformu. // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 2 (18), 2023, pp. 49-61. <http://jeees.ru/category/journal/2023-2/>
10. Nielsen P. // Have Wingsails Gone Mainstream? // *Sail Magazine* // 2.08/2017 // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream/>

11. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf/
12. <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm/>«Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час»/
13. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Vetrotnergeticheskaia ustanovka nazemnogo bazirovaniya s zhostkimi parusami // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 1 (21), 2024, pp. 100-113. <http://jees.ru/category/journal/2024-1/>

Wind Power Plant with Rigid Sails: Direct Measurement of Forces Acting on the Platform

^{1,1} Chekarev Konstantin, ^{1,2} Zalikhhanov Alim

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹konstantintchekarev@yandex.ru,
²bulungu@yandex.ru

Abstract. High-power installations that convert kinetic wind energy into electricity have large dimensions due to 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 eliminated. An experimental installation was developed and created to conduct research on mock-ups of platforms with sails mounted on them. In order to increase the efficiency of wind flow conversion, a rigid sail system was developed, which was installed on the layout of the platform. To conduct research with such a sail system, a wind flow generator was developed and created, providing the necessary velocity distribution in the vertical plane. Experiments have been carried out to directly change the forces acting on a platform with a system of rigid sails. The obtained values are compared with the calculated values found using an improved method for determining the magnitude of forces by the magnitude of the platform speed when moving with loads of different weights. The results of the conducted research are presented in this article.

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