



2025  
№1(25)

# Окружающая среда и энергостудение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703  
(Online)

# Окружающая среда и энергосистемы

---

**Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)**

**2025 №1(25)**

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)

## Ответственный секретарь

Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н.  
(ИО РАН).

## Редакционная коллегия:

Бабурин 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 (ГУ Институт энергетической стратегии).  
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, академик РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Залиханов Алим Михайлович, к.геогр.н, (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Киселева Софья Валентиновна, к.ф.-м.н. (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Красовская Татьяна Михайловна, д.геогр.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Моргунова Мария Олеговна, к.э.н. (КТН Royal Institute of Technology, Sweden).  
Нефедова Людмила Вениаминовна (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Нигматулин Роберт Искандерович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН (ИО РАН).  
Панченко Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент (Российский университет транспорта (МИИТ))  
Показеев Константин Васильевич, д.ф.-м.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
Рафикова Юлия Юрьевна, к.геогр.н. (МГУ им. М.В. Ломоносова)  
Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н. (ИО РАН).  
Слипенчук Михаил Викторович, д.э.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).  
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 энергетическое развитие. 2025 №1(25)

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 31.03.2025.

## 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](mailto: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 энергетическое развитие», 2025

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

## Содержание

Бастрон А.В., Дебрин А.С., Засимов И.И., Цугленок Н.В. Возобновляемые источники энергии: опыт и перспективы использования в условиях Енисейской Сибири. ....	4
Безе Я.И., Шапошников В.В., Кочарян Е.В., Бутузов В.А. Солнечная сетевая электростанция Краснодарской ТЭЦ на розничном рынке региональной энергосистемы в 2023-2024 годах. ....	21
Бушуев В.В., Клепач А.Н., Соловьев Д.А. Геотории: георесурсы, геоэнергетика, геоинфраструктура .....	29
Губий Е.В., Козлов А.Н., Пензик М.В. Оценка использования газогенераторных электростанций на биотопливе в децентрализованных зонах электроснабжения.....	52
Исмаилова Э.А. Рыбные ресурсы западных акваторий Российской Арктики в условиях климатических изменений: потенциал и перспективы освоения. ....	62
Кирпичникова И.М., Серов В.А., Заварухин В.А., Слетова Е.Д. Причины сокращения сроков работы солнечных модулей и способы их предотвращения. ....	80
Матюшенко А.Д. Территории размещения различных видов энергоисточников в Республике Беларусь: экономическая оценка экологического ущерба. ....	89
Махсумов И.Б., Давлатзода А.Н., Холназаров М.Б. Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан. ....	106
Федоров В.М., Дегтярев К.С., Соловьев Д.А. Тенденция изменений температуры поверхности Мирового океана в текущем столетии. ....	129
Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусные ветроэнергетические установки с автоматическим движением платформ. ....	144
Щербуль З.З. Тепловое загрязнение деятельного слоя почвы при эксплуатации геотермального месторождения. ....	160

## Content

Bastron A.V., Debrin A.S., Zasimov I.I., Tsuglenok N.V. Renewable energy sources: experience and prospects of use in the conditions of Yenisey Siberia .....	4
Bize Ya.I., Shaposhnikov V.V., Kocharyan E.V., Butuzov V.A. Solar grid power plant of Krasnodar CHPP in the retail market of the regional energy system in 2023-2024 .....	21
Bushuev V.V., Klepach A.N., Solovyev D.A. Geotories: geo-resources, geo-energy, geo-infrastructure.....	29
Gubiy E.V., Kozlov A.N., Penzik M.V. Assessing the use of biomass-fired gas power plants in decentralized power-supply areas .....	52
Ismailova E.A. Fish resources of the Western waters of the Russian Arctic in the context of climate change: potential and prospects for development ...	62
Kirpichnikova I.M., Serov V.A., Zavarukhin V.A., Sletova E.D. Causes of shortened operation time of photovoltaic modules and ways to prevent them.....	80
Matsiushenka A.D. Areas where different types of energy sources are located in the Republic of Belarus: economic assessment of environmental damage.....	89
Makhsumov I.B., Davlatzoda A.N., Kholnazarov M.B. Analysis of the performance of autonomous solar power plants taking into account environmental aspects using the PVsyst software package in the conditions of the southern regions of the Republic of Tajikistan .....	106
Fedorov V.M., Degtyarev K.S., Solovyev D.A. The trend of changes in the surface temperature of the oceans in the current century.....	129
Chekarev K.V., Zalikhonov A.M. Sailing wind power plants with automatic platform movement .....	144
Shcherbul Z.Z. Thermal pollution of the active soil layer during the operation of a geothermal field .....	160

## Возобновляемые источники энергии: опыт и перспективы использования в условиях Енисейской Сибири

<sup>1,1</sup> Бастрон Андрей Владимирович <sup>[0000-0003-4284-452X]</sup>,

<sup>1,2</sup> Дебрин Андрей Сергеевич <sup>[0009-0001-2059-5537]</sup>,

<sup>2,3</sup> Засимов Иван Игоревич <sup>[0009-0003-8255-8592]</sup>,

<sup>3,4</sup> Цугленок Николай Васильевич <sup>[0000-0001-7985-4217]</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Красноярский государственный аграрный университет, Россия, Красноярск

<sup>2</sup>ПАО «Россети Сибири», Россия, Красноярск

<sup>3</sup>Восточно-Сибирская ассоциация биотехнологических кластеров, Россия, Красноярск

E-mail: <sup>1</sup>abastron@yandex.ru, <sup>2</sup>debrin.as@yandex.ru,  
<sup>3</sup>za.vano@mail.ru, <sup>4</sup>ntsuglenok@mail.ru

**Аннотация.** В статье показан положительный практический опыт использования ВИЭ (ветровая энергия, энергия малых рек, энергия биотоплива растительного и животного происхождения, тепловая энергия земли, солнечная энергия) в муниципальных образованиях на территории Енисейской Сибири, который после оценки технического и экономического потенциалов ВИЭ может быть широко внедрен. Произведена оценка технико-экономического потенциала солнечной энергетики на территории Енисейской Сибири. Использование СЭС в составе СДЭС в южных районах позволяет снизить потребление дизельного топлива на 25 – 50 %, а в более северных районах, например, в п. Тура и с. Ванавара Красноярского края – на 20 – 25 %, тем самым продлить на указанные проценты срок службы ДГ. При этом себестоимость электрической энергии, произведенной СЭС, входящей в состав СДЭС, составляет: п. Тура, – 16,38; с. Ванавара – 15,54; п. Машуковка – 12,93; с. Бея – 11,82; с. Качык – 10,27 руб/кВт·ч, а от ДГ: 56,92; 51,45; 39,72; 36,37 и 36,18 руб/кВт·ч соответственно.

**Ключевые слова:** Енисейская Сибирь, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, солнечная энергетика, малая гидроэнергетика, биоэнергетика, тепловая энергия земли, солнечная энергетика, солнечное излучение, солнечная электростанция, солнечно-дизельная электростанция, себестоимость электроэнергетики

## 1 Введение

В настоящее время в России и в мире в целом происходит массовое строительство отдельных ветроэнергетических установок (ВЭУ), ветровых электрических станций (ВЭС) и ветродизельных электростанций (ВДЭС); солнечных электростанций (СЭС) и солнечно-дизельных электростанций (СДЭС), сопряженных с дизельными генераторами (ДГ) и оснащенных аккумуляторными батареями (АБ); биогазовых установок (БГУ), работающих на отходах растительного и животного происхождения; теплонасосных установок (ТНУ) и других энергетических установок, использующих в качестве источника энергии возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [1 - 9]. Однако, прежде чем широко внедрять в сельском хозяйстве энергетические установки с использованием ВИЭ, необходимо оценить практический опыт их эксплуатации в регионе, а также технический и экономический потенциал ВИЭ в данной местности.

## 2 Цель работы

Целью работы является исследование опыта использования ВИЭ в условиях Енисейской Сибири, рассмотрение технико-экономического аспекта эффективного использования ВИЭ на примере солнечной энергии в автономных системах электроснабжения сельскохозяйственного производства и быта.

Для достижения цели исследования необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать опыт использования ВИЭ в условиях Енисейской Сибири.
2. Дать технико-экономическое сравнение себестоимости электрической энергии, полученной от СЭС и СДЭС и тарифов на электрическую энергию для населения, проживающего в сельской местности, а также для сельскохозяйственных товаропроизводителей (крестьянско-фермерских хозяйств) в условиях Енисейской Сибири.

## 3 Методы исследования

В основе исследования представлен практический опыт использования ВИЭ (ветровая энергия, солнечная энергия, энергия малых рек, энергия биотоплива растительного и животного происхождения, тепловая энергия земли) в условиях Енисейской Сибири, а также лежит процесс моделирования технико-экономиче-

ских показателей СЭС и СДЭС при учете их режимов работы в условиях Енисейской Сибири.

В Красноярском государственном аграрном университете обучаются в основном студенты, проживающие на территории Енисейской Сибири, к которой относятся: Красноярский край, республики Хакасия и Тыва. При подготовке студентов бакалавриата и магистратуры по направлению «Агроинженерия», направленность (профиль) «Электрооборудование и электротехнологии в АПК» преподаются дисциплины, связанные с обоснованием и эффективным использованием ВИЭ для энергообеспечения сельскохозяйственного производства и быта, с учетом технического и экономического потенциалов места использования ВИЭ.

Красноярский край – второй по площади субъект РФ, занимает 2366,8 тыс. кв. км (или 13,86 % территории страны). Протяжённость территории от севера до горных районов Южной Сибири почти 3000 км. Население 2 845 тыс. чел.

Республика Хакасия – это небольшая территория на юге Сибири. Преобладающий рельеф местности — степи, горы и тайга. В республике более 500 озёр, 330 рек и мелких речушек. Население республики – 534 тыс. человек.

Республика Тыва представляет собой гористый регион с чередованием горных хребтов и межгорных котловин. Около 80 % территории республики занимают горы, и лишь оставшаяся её часть – равнинные степные участки. Население 337 тыс. человек.

### Ветроэнергетика

На территории Енисейской Сибири имеется опыт использования ветровой энергии для децентрализованного электроснабжения отдельных объектов. Речь идет о ВДЭС на Таймыре, включающей 5 ветроустановок по 20 кВт (рис. 1), а также об отдельных ветроустановках на севере (рис. 2) и в гористой местности юга Енисейской Сибири (рис. 3) [2].

Технический и экономический потенциалы ветровой энергетики Красноярского края в разрезе муниципальных образований подробно представлен в [2].



**Рис. 1.** ВДЭС в п. Левинские пески Таймырского муниципального образования (5 ветроустановок мощностью 20 кВт каждая) [2]



**Рис. 2.** ВЭС в п. Тура Эвенкийского муниципального района (две ветроустановки Сапсан-500 мощностью 0,5 кВт каждая) [2]



**Рис. 3.** ВЭС на туристической базе в Восточных Саянах (две ветроустановки «Hummer Dynamo») [2]

#### **Малая гидроэнергетика**

Характерным примером эффективного использования энергии малых рек в Енисейской Сибири является микроГЭС в с. Кызыл-Хая республики Тыва (рис. 4) [10]. МикроГЭС обеспечивает электрической энергией расположенную далеко от центральных сетей электроснабжения туристическую базу.



**Рис. 4.** МикроГЭС (три гидроагрегата микро-ГЭС-50Прпо мощностью по 50 кВт каждый) в с. Кызыл-Хая республики Тыва [10]

### **Биоэнергетика**

#### *Биогаз*

На свиномкомплексе «Агроэлита» Емельяновского района Красноярского края биогазовая установка была введена в эксплуатацию в 2017 году (рис. 5) [11]. После накопления отходов и отладки оборудования установку запустили на полную мощность. Биокomплекс поглощает все виды отходов свиномкомплекса и производит биогаз, что позволяет сохранять экологию в окружающем свиномкомплексе пространстве. Произведенный биогаз на четверть покрывает потребности свиномкомплекса в газе, необходимом для подогрева теплоносителя для технологических нужд предприятия.



**Рис. 5.** Биогазовая установка на свиномкомплексе «Агроэлита» [11]



*Древесные отходы*

Древесные отходы лесопромышленных и деревообрабатывающих предприятий в Красноярском крае в год составляют около 4,5 млн м<sup>3</sup>. Крупнейшим производителем пеллет в Красноярском крае является ООО «ДОК «Енисей»», который производит более 80 000 тонн пеллет в год [12]. В 2018 г. в г. на промышленной площадке Лесосибирского ЛДК № 1 состоялась запуск технологической линии производства пеллет (рис. 6). Мощность производства – 70 000 тонн готовой продукции. Однако, в связи со сложностями поставки продукции на европейский рынок, где цена на пеллеты и брикеты значительно выше, чем в России, такие предприятия будут нести убытки, пока не найдут новые рынки сбыта своей продукции. Использование пеллет и брикет в муниципальных котельных, расположенных недалеко от их места производства, требует использования специальных котлов и дотаций со стороны государства, т.к. использование угля в качестве топлива в большинстве случаев рентабельнее.

На наш взгляд, в связи со стремлением властей г. Красноярска и Красноярского края перевести частный сектор на более экологически чистое топливо, целесообразно предлагать населению переход с угля на пеллеты и топливные брикеты, тем более, что отопительные котлы разной мощности, работающие на пеллетах и брикетах, выпускаются на предприятии «ZOTA» в г. Красноярске (рис. 7) [13].



Рис. 6. Установка по производству пеллет [12]



Рис. 7. Котлы предприятия «ZOTA» для сжигания пеллет и брикет [13]

### Тепловая энергия земли

В Красноярском крае имеется ряд индивидуальных жилых домов, в которых в качестве отопительного устройства используются теплонасосные системы отопления с вертикальными грунтовыми теплообменниками, а в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии выступает тепловая энергия грунта (рис. 8) [14]. Использование теплонасосных установок позволяет снизить плату за потребленную на отопление дома электрическую энергию в 3-4 раза.



Рис. 8. Теплонасосная система отопления сельского жилого дома [14]

### Солнечная энергетика

На территории Енисейской Сибири имеется определенный опыт строительства и эксплуатации СЭС и СДЭС. В подтверждение выше сказанного можно привести СДЭС, построенную в Красноярском крае в п. Тура Эвенкийского муниципального района (рис. 8) [15], суммарной мощностью 14,1 МВт (мощность СЭС составляет 2,5 МВт; СЭС включает в себя 6 тыс. солнечных модулей (СМ)).



Рис. 8. СДЭС в п. Тура [15]

В 2015 г. в республике Хакасия была запущена Абаканская СЭС установленной мощностью 5,2 МВт [16]. Годовое производство электроэнергии в среднем составляет 6,5 млн кВтч. На станции установлены более 20 тыс. СМ (рис. 9).



Рис. 9. СЭС Абаканская [16]

В республике Тыва в селах Мугур-Аксы и Кызыл Хая эксплуатируются две СДЭС мощностью по 550 кВт (рис. 10) [8].

Кроме приведенных выше СЭС, на территории Енисейской Сибири эксплуатируются небольшие индивидуальные СЭС (от нескольких сотен Вт до нескольких кВт), установленные на крышах домов, хозяйственных построек и других объектов и предназначенных, например, для электроснабжения крестьянско-фермерских хозяйств [5].



Рис. 10. Автономная гибридная энергетическая установка в республике Тыва [8]

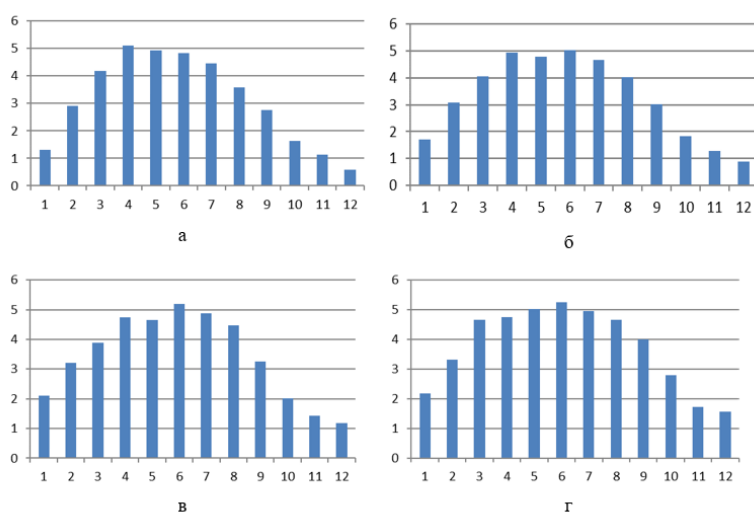
Развитию автономных систем электроснабжения с использованием ВИЭ на территории Енисейской Сибири уделяется довольно большое внимание властей.

Так, в Мотыгинском районе Красноярского края первые пять автономных СДЭС совокупной стоимостью в 228 млн. рублей должны быть построены уже в ближайшие годы [9]. Всего же в крае около 100 населенных пунктов, где эта технология может быть востребована. Интерес проявляют Республики Тыва и Хакасия. По данным директора Хакасского филиала Россети Сибирь, сейчас в очереди на технологическое подключение к электросетям 15 КФХ [9]. Это те хозяйства, техприсоединение которых наиболее затратно в силу их удаленности и иных факторов. Шесть КФХ - в Бейском районе, по два - в Аскизском, Ширинском, Алтайском, Усть-Абаканском и один - в Орджоникидзевском районе. На автономное электроснабжение каждого КФХ может быть потрачено от 2 до 10 миллионов или около 90 миллионов на все 15 хозяйств.

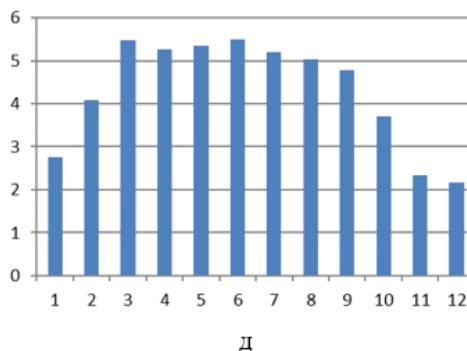
#### 4 Результаты исследования и их обсуждение

##### *Исходные данные.*

Для сельских поселений Енисейской Сибири, с учетом их географического расположения и дальнейшего возможного использования СДЭС, по методике, изложенной в [17], в электронных таблицах Excel выполнено моделирование суммарного среднесуточного удельного солнечного излучения на поверхности солнечного модуля (СМ) СЭС при угле наклона СМ, равном широте местности. В качестве исходных данных для расчета параметров СЭС приняты данные с сайта NASA [18]. Ежемесячное суммарное среднесуточное удельное солнечное излучение на поверхности СМ при угле наклона  $\beta$  СМ, равному широте местности,  $\mathcal{E}_{\text{уд}}^{\beta}$ , кВтч/м<sup>2</sup>, для разных мест установки СМ на территории Енисейской Сибири приведено на рис. 11.



Г



**Рис. 11.** Среднесуточное удельное солнечное излучение  $\mathcal{E}_{уд i \beta}$ , кВтч/м<sup>2</sup>: а) Красноярский край п. Тура (Эвенкийский район); б) Красноярский край с. Ванавара (Эвенкийский район); в) Красноярский край п. Машуковка (Мотыгинский район); г) Республика Хакасия с. Бея (Бейский район); д) Республика Тыва с. Качык (Эрзинский кожуун)

При этом суммарное среднегодовое удельное солнечное излучение,  $\mathcal{E}_{уд год \beta}$ , кВтч/м<sup>2</sup>, составляет: п. Тура – 1138, с. Ванавара – 1192, п. Машуковка – 1248, с. Бея – 1366, с. Качык – 1571.

Анализ, приведенных на рис. 11 графиков, показал, что ежемесячное суммарное среднесуточное удельное солнечное излучение на поверхности СМ при угле наклона  $\beta$  СМ, равному широте местности, в таких сельских поселениях как с. Качык (республика Тыва), в период с марта по август изменяется незначительно, а в зимние месяцы составляет 40 – 50 % от летних месяцев. Указанное сельское поселение расположено значительно выше над уровнем моря, преимущественно в горной местности, в отличие от остальных, расположенных в равнинной части Енисейской Сибири. Состав, установленная мощность и режимы работы оборудования СДЭС в каждом населенном пункте будут зависеть от изменения солнечного излучения в течение суток, месяца, года: чем равномернее будет график поступления солнечного излучения на солнечную батарею (СБ), состоящую из СМ, тем меньше могут быть время работы ДЭС и емкость аккумуляторной батареи (АБ). Как показывает опыт эксплуатации СДЭС в Тыве и других южных районах, использование СЭС в составе СДЭС позволяет снизить потребление дизельного топлива на 25 – 50 %, а в более северных районах, например в п. Тура и с. Ванавара Красноярского края – на 20 – 25 %, тем самым продлить на указанные проценты срок службы ДГ.

#### **Моделирование себестоимости электроэнергетики, произведенной СЭС и ДЭС**

Как было показано выше, для ряда крестьянско-фермерских хозяйств Енисейской Сибири, занимающихся отгонным животноводством (овцеводством, молоч-

ным животноводством, мясным скотоводством – откормом молодняка КРС и лошадей на мясо) и первичной переработкой молока и мяса, и другими видами мелкого товарного сельскохозяйственного производства, требуется проектирование и строительство децентрализованных систем электроснабжения с расчетной мощностью до 15 кВт (разрешенная мощность технологического присоединения для данного вида потребителей) и среднегодовым потреблением 9000 кВт·ч., т.к. они в силу своей удаленности не могут быть подключены к системе центрального электроснабжения. В качестве альтернативы принятого децентрализованного варианта электроснабжения таких потребителей от ДЭС в связи с бурным развитием солнечной энергетики в России в последние годы целесообразно рассмотреть другой вариант – замещение дизельного топлива солнечной энергией, т.е. использования СЭС. Себестоимость производства электроэнергии, произведенной в системах децентрализованного электроснабжения указанных сельскохозяйственных потребителей Енисейской Сибири от СЭС и ДЭС, должна быть оценена по сравнению с тарифами на электрическую энергию от энергосбытовых компаний для сельского населения и сельхозтоваропроизводителей Красноярского края, республик Хакасия и Тыва для обоснования дотаций при расчете с сельхозпроизводителями за реализованную продукцию.

Оценка эффективности использования СЭС может быть произведена путем сравнения себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, выработанной СЭС, ДЭС с расчетной мощностью 15 кВт и полученной от традиционных источников [9, 20, 21, 22].

В качестве сравниваемых вариантов приняты следующие комплекты оборудования:

- гибридная электростанция H8-DH-19200 [8];
- номинальная мощность установки - 15 кВт;
- количество солнечных модулей - 48 шт.;
- занимаемая площадь солнечных модулей (ориент.) – 100 м<sup>2</sup>;
- емкость АКБ 4,8 кВт·ч;
- фотоэлектрический модуль Хевел HVL-320/НЛТ;
- инвертор Deye SUN-5K-SG03LP1-EU;
- АКБ 4 шт.;
- ДЭС [23];
- дизель-генератор Motor АД15-Т400 R в контейнере с АВР мощностью 15 кВт.

Расчет себестоимости электроэнергии, произведенной СЭС и ДЭС производился в электронных таблицах Excel по методике, подробно изложенной нами в работе [9].

Стоимость оборудования на сентябрь 2024 г. составляла: СЭС - 1 736 990 руб. [8], ДЭС - 536 981 руб. [9]. Срок службы оборудования, согласно техническому паспорту, составляет 25 лет. Отсюда норма амортизационных отчислений в расчетах принята равной 0,04 (или 4%). Поскольку денежные средства на проектирование и строительство децентрализованных систем электроснабжения указан-

ных сельхозтоваропроизводителей выделяются государством под открытие новых сельскохозяйственных производств безвозвратно, то не требуется расчет дисконтированного дохода.

Стоимость дизельного топлива для ДГ принималась равной стоимости на заправочных станциях указанных населенных пунктов на 25 сентября 2024 г. [19]. Стоимость дизельного топлива была: 81,20; 75,70; 73,20; 69,17 и 77,66 руб/л – в п. Тура, с. Ванавара, п. Машуковка, с. Бея и с. Качык соответственно [19].

Результаты моделирования экономических показателей сравниваемых вариантов децентрализованного электроснабжения указанных в табл. 1 сельских поселений Енисейской Сибири представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Сравнение себестоимости электроэнергии, произведенной СЭС и СДЭС при децентрализованном электроснабжении потребителей с действующими тарифами на электроэнергию при централизованном электроснабжении

Населенный пункт	Себестоимость электроэнергии от СЭС, $C_{СЭС}$ , руб./кВт·ч	Себестоимость электроэнергии от ДЭС, $C_{ДЭС}$ , руб./кВт·ч	Тарифы на электроэнергию от энергосбытовой компании для сельского населения трехзонный тариф (ночь/пик/полупик) руб./кВт·ч [20]	Тарифы на электроэнергию для с/х товаропроизводителей, руб./кВт·ч [21]
1	2	3	4	5
Красноярский край п. Тура	16,38	56,92	1,48/3,26/2,47	-
Красноярский край с. Ванавара	15,54	51,45	1,48/3,26/2,47	-
Красноярский край п. Машуковка	12,93	39,72	1,48/3,26/2,47	9,09
Республика Хакасия с. Бея	11,82	36,37	1,03/2,5/2,03	7,34
Республика Тыва с. Качык	10,27	36,18	2,56/4,14/3,19	7,21

## 5 Выводы

1. На территории Енисейской Сибири имеется ряд потребителей, получающих электроснабжение и даже теплоснабжение от ДЭС, что приводит к высокой себестоимости электрической и тепловой энергии, получаемой за счет использования дизельного топлива (50 руб/ кВтч и даже выше) и к загрязнению окружающей среды. Только в Красноярском крае установленная мощность ДЭС составляет более 100 МВт, на которых вырабатывается около 200 млн кВтч электрической энергии.

2. В связи с выделением значительных средств на автономные системы электроснабжения КФХ, расположенных на территории Енисейской Сибири, актуальным становится вопрос технико-экономической оценки различных вариантов систем электроснабжения, в том числе с использованием ВИЭ.

3. Как показал проведенный нами обзор, во многих муниципальных образованиях на территории Енисейской Сибири имеется положительный практический опыт использования ВИЭ (ветровая энергия, энергия малых рек, энергия биотоплива растительного и животного происхождения, тепловая энергия земли, солнечная энергия), который после оценки технического и экономического потенциалов использования указанных ВИЭ в конкретном муниципальном образовании может быть успешно внедрен.

4. Нами произведена оценка технико-экономического потенциала солнечной энергетики на территории Енисейской Сибири. Ежемесячное суммарное среднесуточное удельное солнечное излучение на поверхности СМ при угле наклона  $\beta$  СМ, равном широте местности, в таких сельских поселениях как с. Качык (республика Тыва) в период с марта по август изменяется незначительно, а в зимние месяцы составляет 40 – 50 % от летних месяцев. Использование СЭС в составе СДЭС позволяет снизить потребление дизельного топлива на 25 – 50 %, а в более северных районах, например, в п. Тура и с. Ванавара Красноярского края – на 20 – 25 %, тем самым продлить на указанные проценты срок службы ДГ. При этом себестоимость электрической энергии, произведенной СЭС, входящей в состав СДЭС, составляет: п. Тура, – 16,38; с. Ванавара – 15,54; п. Машуковка – 12,93; с. Бея – 11,82; с. Качык – 10,27 руб/кВтч, а от ДГ: 56,92; 51,45; 39,72; 36,37 и 36,18 руб/кВтч соответственно.

5. Себестоимость электроэнергии, произведенной от СДЭС будет находится в указанном промежутке и будет зависеть от параметров и режимов работы СЭС, входящей в состав СДЭС. Себестоимость производства электроэнергии, произведенной в системах децентрализованного электроснабжения крестьянско-фермерских хозяйств Енисейской Сибири, занимающихся отгонным животноводством (овцеводством, молочным животноводством, мясным скотоводством – откормом молодняка КРС и лошадей на мясо) и первичной переработкой молока и мяса, и другими видами мелкого товарного сельскохозяйственного производства,



от СЭС и ДЭС, оценена по сравнению с заведомо более низкими тарифами на электрическую энергию от энергосбытовых компаний для сельхозтоваропроизводителей Красноярского края, республик Хакасия и Тыва для обоснования соответствующими министерствами сельского хозяйства Красноярского края, Хакасии и Тывы дотаций при расчете с сельхозпроизводителями за реализованную продукцию.

## Литература

1. Состояние и перспективы развития электроэнергетики Китая в контексте углеродной нейтральности промышленности / Хе Х., Тягунов М.Г., Ту Р.М. // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 3. С. 82-92.
2. Бастрон А.В. Ветроэнергетика Красноярского края / А.В. Бастрон, В.А. Тремясов, Н.В. Цугленок, А.В. Чебодаев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2015. – 252 с.
3. Бастрон А.В. Использование ветроэнергетических установок в Красноярском крае, республиках Хакасия и Тыва для горячего водоснабжения усадебных домов (коттеджей). Научно-практические рекомендации / А.В. Бастрон, Н.Б. Михеева, Н.В. Цугленок, А.В. Чебодаев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2004. – 103 с.
4. Ахметшин А.Т. Экономические особенности развития солнечной фотоэнергетики / А.Т. Ахметшин, С.К. Шерьязов // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2017. № 2 (20). С. 57-66.
5. Использование солнечных фотоэлектрических станций для автономных систем электроснабжения крестьянско-фермерских хозяйств / Чебодаев А.В., Бастрон А.В., Урсегов В.Н., Дебрин А.С., Смелова С.А. // В сборнике: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК. материалы XII международной научно-практической интернет-конференции. 2016. С. 204-210.
6. Саврасов Ф.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях западной Сибири / Ф.В. Саврасов, Б.В. Лукутин // Известия Томского политехнического университета, 2013. Т. 322. №6. С. 17-21.
7. Автономные гибридные энергоустановки в республике Тыва / Группа компаний ХЕВЕЛ // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hevelsolar.com/projects/avtonomnye-gibridnye-energoustanovki-v-respublike-tyva/>
8. Внедрение энергоэффективных солнечных решений для надежного и круглосуточного энергоснабжения потребителей в удаленных и изолированных территориях / Группа компаний ХЕВЕЛ // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hevelsolar.com/b2g/>
9. Бастрон А.В., Бастрон Т.Н., Наумов И.В. и др. Техничко-экономический аспект использования солнечных электростанций в системах электроснабжения сельскохозяйственного производства и быта в условиях Сибири / Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2023. № 3 (29). С. 101-116.
10. Минигидроэлектростанция «Кызыл-Хая» / ИНСЭТ. Реализованные проекты [Электронный ресурс]. – URL: <https://inset.ru/realizovannyye-proekty/kyzyl-haja/>
11. Биогазовая установка «Агроэлита» - генератор прибыли / Аргументы и факты. Красноярск [Электронный ресурс]. – URL: [https://krsk.aif.ru/money/biogazovaya\\_ustanovka\\_agroelita\\_-\\_generator\\_pribyli?ysclid=m1glqoa4jf987001211](https://krsk.aif.ru/money/biogazovaya_ustanovka_agroelita_-_generator_pribyli?ysclid=m1glqoa4jf987001211)

12. Развитие производства пеллет в Красноярском крае / ЛПК Сибири [Электронный ресурс]. – URL: <https://lpk-sibiri.ru/bioenergetics/pellet-plants/razvitie-proizvodstva-pellet-v-krasnoyarskom-krae/?ysclid=m1ipwgpuzh249329885>
13. Автоматические угольные и пеллетные котлы / ZOTA [Электронный ресурс]. – URL: [https://zota.ru/catalog/avto\\_kotly/zota\\_pellet/?ysclid=m1iu1t08fz295320411](https://zota.ru/catalog/avto_kotly/zota_pellet/?ysclid=m1iu1t08fz295320411)
14. Галерея работ / Геотермальное отопление в Красноярске. Без угля, пыли, грязи и дыма! Дешево, экологично! [Электронный ресурс]. – URL: [https://xn--24-glc8bt.xn--p1ai/main/gallery\\_of\\_works/](https://xn--24-glc8bt.xn--p1ai/main/gallery_of_works/)
15. В Красноярском крае заработала крупнейшая в России солнечная электростанция. [Электронный ресурс]. – URL: <https://dela.ru/news/278897/>
16. Компания «ЕвроСибЭнерго» запустила крупнейшую солнечную электростанцию в Сибири. Новый источник энергии / [Электронный ресурс]. – URL: <https://newslab.ru/article/692783?ysclid=m1hiyourre830303163>
17. Бастрон А.В. Энергообеспечение потребителей с использованием возобновляемых источников энергии: учеб. пособие / А.В. Бастрон, С.К. Шерьязов; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. – 118 с.
18. POWER DATA ACCESS VIEWER / NASA Prediction Of World wide Energy Resources [Электронный ресурс]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>
19. Цены на топливо 24 сентября 2024 / MultiGO: ТОПЛИВО // [Электронный ресурс]. URL: <https://multigo.ru/benzin/58.1821;94.698/3>
20. Практикум по применению гидроветроэнергетических установок в сельском хозяйстве: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Бастрон А.В., Коровайкин Н.В., Костюченко Л.П. и [др.]; Краснояр. гос. аграр. ун-т, Красноярск, 2014. – 208 с.
21. Тарифный калькулятор для граждан Российской Федерации / Тарифный калькулятор для физических лиц [Электронный ресурс]. – URL: <https://etarif.ru/fiz>
22. Тарифный калькулятор для граждан Российской Федерации / Тарифный калькулятор для юридических лиц [Электронный ресурс]. – URL: <https://etarif.ru/ur>
23. MOTOR АД15-T400-R В КОНТЕЙНЕРЕ С АВР / Дизельные генераторы [Электронный ресурс]. – URL: [https://generator-kvt.ru/product/motor-ad15\\_t400\\_r-v-konteynere](https://generator-kvt.ru/product/motor-ad15_t400_r-v-konteynere)

## References

1. Sostoyanie i perspektivy` razvitiya e`lektroe`nergetiki Kitaya v kontekste uglerodnoj nejtral`nosti promy`shlennosti / Xe X., Tyagunov M.G., Tu R.M. // Vestnik Moskovskogo e`nergeticheskogo instituta. Vestnik ME`I. 2022. № 3. S. 82-92.
2. Bastron A.V. Vetroe`nergetika Krasnoyarskogo kraja / A.V. Bastron, V.A. Tremyasov, N.V. Czuglenok, A.V. Chebodaev; Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t. – Krasnoyarsk, 2015. – 252 s.
3. Bastron A.V. Ispol`zovanie vetroe`nergeticheskix ustanovok v Krasnoyarskom krae, respublikax Hakasiya i Ty`va dlya goryachego vodosnabzheniya usadebny`x domov (kottedzhej). Nauchno-prakticheskie rekomendacii / A.V. Bastron, N.B. Mixeeva, N.V. Czuglenok, A.V. Chebodaev; Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t. – Krasnoyarsk, 2004. – 103 s.
4. Axmetshin A.T. E`konomicheskie osobennosti razvitiya solnechnoj fotoe`nergetiki / A.T. Axmetshin, S.K. Sher`yazov // Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, e`konomika. Seriya: E`konomika. 2017. № 2 (20). S. 57-66.
5. Ispol`zovanie solnechny`x fotoe`lektricheskix stancij dlya avtonomny`x sistem e`lektrosnabzheniya krest`yansko-fermerskix hozyajstv / Chebodaev A.V., Bastron A.V., Ursegov V.N., Debrin A.S., Smelova S.A. // V sbornike: E`NERGO- I RESURSOSBEREZHENIE -

- XXI VEK. materialy` XII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii. 2016. S. 204-210.
6. Savrasov F.V. Raschet e`ffektivnosti ispol`zovaniya avtonomny`x sistem e`lektrosnabzheniya s fotoe`lektrostanciyami v usloviyax zapadnoj Sibiri / F.V. Savrasov, B.V. Lukutin // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta, 2013. T. 322. №6. S. 17-21
  7. Avtonomny`e gibridny`e e`nergoustanovki v respublike Ty`va / Gruppa kompanij XEVEL // [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://www.hevelsolar.com/projects/avtonomnye-gibridnye-energoustanovki-v-respublike-tyva/>
  8. Vnedrenie e`nergoe`ffektivny`x solnechny`x reshenij dlya nadezhnogo i kruglosutochnogo e`nergosnabzheniya potrebitel' v udalenny`x i izolirovanny`x territoriyax / Gruppa kompanij XEVEL // [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://www.hevelsolar.com/b2g/>
  9. Bastron A.V., Bastron T.N., Naumov I.V. i dr. Tekniko-e`konomicheskij aspekt ispol`zovaniya solnechny`x e`lektrostancij v sistemax e`lektrosnabzheniya sel`skoxozyajstvennogo proizvodstva i by`ta v usloviyax Sibiri / Social`no-e`konomicheskij i gumanitarny`j zhurnal. 2023. № 3 (29). S. 101-116.
  10. Minigidroe`lektrostanciya «Ky`zy`l-Xaya» / INSE`T. Realizovanny`e proekty` [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://inset.ru/realizovannye-proekty/kyzyl-haja/>
  11. Biogazovaya ustanovka «Agroe`lita» - generator priby`li / Argumenty` i fakty`. Krasnoyarsk [E`lektronny`j resurs]. – URL: [https://krsk.aif.ru/money/biogazovaya\\_ustanovka\\_agroelita\\_-\\_generator\\_pribyli?ysclid=m1g1qoa4jf987001211](https://krsk.aif.ru/money/biogazovaya_ustanovka_agroelita_-_generator_pribyli?ysclid=m1g1qoa4jf987001211)
  12. Razvitie proizvodstva pellet v Krasnoyarskom krae / LPK Sibiri [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://lpk-sibiri.ru/bioenergetics/pellet-plants/razvitie-proizvodstva-pellet-v-krasnoyarskom-krae/?ysclid=m1ipwgpuzh249329885>
  13. Avtomaticheskie ugol`ny`e i pelletny`e kotly` / ZOTA [E`lektronny`j resurs]. – URL: [https://zota.ru/catalog/avto\\_kotly/zota\\_pellet/?ysclid=m1iu1t08fz295320411](https://zota.ru/catalog/avto_kotly/zota_pellet/?ysclid=m1iu1t08fz295320411)
  14. Galereya rabot / Geotermal`noe otoplenie v Krasnoyarske. Bez ugl'ya, py`li, gryazi i dy`ma! Deshevo, e`kologichno! [E`lektronny`j resurs]. – URL: [https://xn--24-glc8bt.xn--p1ai/main/gallery\\_of\\_works/](https://xn--24-glc8bt.xn--p1ai/main/gallery_of_works/)
  15. V Krasnoyarskom krae zarabotala krupnejshaya v Rossii solnechnaya e`lektrostanciya. [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://dela.ru/news/278897/>
  16. Kompaniya «EvrosibE`nergo» zapustila krupnejshuyu solnechnuyu e`lektrostanciyu v Sibiri. Novy`j istochnik e`nergii / [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://newslab.ru/article/692783?ysclid=m1hiyourre830303163>
  17. Bastron A.V. E`nergoobespechenie potrebitel' s ispol`zovaniem vozobnovlyaemy`x istochnikov e`nergii: ucheb. posobie / A.V. Bastron, S.K. Sher`yazov; Krasnoyar. gos. agrar. un-t. – Krasnoyarsk, 2019. – 118 s.
  18. POWER DATA ACCESS VIEWER / NASA Prediction Of World wide Energy Resources [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>
  19. Ceny` na toplivo 24 sentyabrya 2024 / MultiGO: TOPLIVO // [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://multigo.ru/benzin/58.1821;94.698/3>
  20. Praktikum po primeneniyu gidrovetroe`nergeticheskix ustanovok v sel`skom xozyajstve: ucheb. posobie. – 2-e izd., pererab. i dop. / Bastron A.V., Korovajkin N.V., Kostyuchenko L.P. i [dr.]; Krasnoyar. gos. agrar. un-t, Krasnoyarsk, 2014. – 208 s.
  21. Tarifny`j kal`kulyator dlya grazhdan Rossijskoj Federacii / Tarifny`j kal`kulyator dlya fizicheskix licz [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://etarif.ru/fiz>
  22. Tarifny`j kal`kulyator dlya grazhdan Rossijskoj Federacii / Tarifny`j kal`kulyator dlya yuridicheskix licz [E`lektronny`j resurs]. – URL: <https://etarif.ru/ur>
  23. MOTOR AD15-T400-R V KONTEJNERE S AVR / Dizel`ny`e generatory` [E`lektronny`j resurs]. – URL: [https://generator-kvt.ru/product/motor-ad15\\_t400\\_r-v-konteynere](https://generator-kvt.ru/product/motor-ad15_t400_r-v-konteynere)

## Renewable Energy Sources: Experience and Prospects of Use in the Conditions of Yenisey Siberia

<sup>1,1</sup> Andrey Bastron, <sup>1,2</sup> Andrey Debrin, <sup>2,3</sup> Ivan Zasimov, <sup>3,4</sup> Nikolay Tsuglenok

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Rosseti Siberia, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> East Siberian Association of Biotechnological Clusters, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: <sup>1</sup>abastron@yandex.ru, <sup>2</sup>debrin.as@yandex.ru,  
<sup>3</sup>za.vano@mail.ru, <sup>4</sup>ntsuglenok@mail.ru

**Abstract.** The article shows the positive practical experience of using renewable energy sources (wind energy, energy of small rivers, energy of biofuels of plant and animal origin, thermal energy of the earth, solar energy) in municipalities on the territory of Yenisey Siberia, which can be widely implemented after assessing the technical and economic potential of renewable energy sources. We have assessed the technical and economic potential of solar energy in the territory of Yenisey Siberia. The use of solar power plants as part of solar-diesel power plants in the southern regions makes it possible to reduce the consumption of diesel fuel by 25-50%, and in more northern areas, for example, in the village of Tura and the village of Vanavara in the Krasnoyarsk Territory - by 20-25%, thereby extending the service life of diesel generators by the specified percentage. At the same time, the cost of electricity produced by the solar power plant, which is part of the solar-diesel power plant, is: Tura village – 16.38; Vanavara village – 15.54; Mashukovka village – 12.93; Beya village – 11.82; Kachyk village - 10.27 rub./kWh, and from diesel generators: 56.92; 51.45; 39.72; 36.37 and 36.18 rub./kWh, respectively.

**Keywords:** Yenisei Siberia, renewable energy sources, wind power, solar energy, small hydropower, bioenergy, thermal energy of the earth, solar energy, solar radiation, solar power plant, solar-diesel power plant, cost of electricity

УДК 620.92

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-21-28

EDN: GURCUZ

## Солнечная сетевая электростанция Краснодарской ТЭЦ на розничном рынке региональной энергосистемы в 2023-2024 годах

<sup>1,1</sup> Безе Ярослав Игоревич,  
<sup>2,2</sup> Шапошников Валентин Васильевич<sup>[0000-0003-0552-9774]</sup>,  
<sup>2,3</sup> Кочарян Евгений Валерьевич<sup>[0009-0009-5141-2455]</sup>,  
<sup>3,4</sup> Бутузов Виталий Анатольевич<sup>[0000-0003-2347-9715]</sup>

<sup>1</sup>ООО «Лукойл-Кубаньэнерго»,

<sup>2</sup>Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

<sup>3</sup>Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

E-mail: <sup>1</sup> yaroslav.beze@lukoil.com,  
<sup>2</sup> shaposhnikov.valentin@gmail.com,  
<sup>3</sup> kocha99@mail.ru, <sup>4</sup> ets@nextmail.ru

**Аннотация.** Для первой в регионе сетевой солнечной электростанции (СЭС) Краснодарской ТЭЦ пиковой мощностью 2,35 МВт, построенной в 2022 г. на основе фотоэлектрических модулей (ФЭМ) ГК «Хевел» описаны основные технические решения, приведены принципиальные электрические схемы типового блока ФЭМ и СЭС в целом, результаты плановой и фактической выработки, собственных нужд станции в 2023, 2024 гг. Описаны основные отказы оборудования. Приведены оценки стоимости выработанной электрической энергии и работ по обслуживанию.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические модули (ФЭМ), солнечная электростанция (СЭС), инвертор, гелиополе, ДПМ, одноставочный тариф.

### 1 Введение

Краснодарская ТЭЦ с установленной мощностью 1060 МВт работает на природном газе и в своем составе имеет четыре паротурбинных энергоблока по 160 МВт и парогазовый блок мощностью 410 МВт. Для снижения экономического ущерба на ТЭЦ ведется работа по сжиганию природного газа в чистом кислороде

в котлах паротурбинных блоков [1], а также в 2022г построена первая в Краснодарском крае сетевая СЭС. При этом был использован опыт их сооружения в других регионах страны [2,3], а также результаты эксплуатации мегаваттных СЭС на предприятиях Краснодарского края (гибридные СЭС) [4].

СЭС Краснодарской ТЭЦ с пиковой мощностью 2,35 МВт предназначена для компенсации потерь в электрических сетях розничного рынка региона. Заказчиком выступило ООО «Лукойл-Кубаньэнерго». По результатам состоявшегося в 2022 г. тендера с ним был заключен договор компенсации дополнительной мощности (ДПМ), в рамках которого заказчик оплатил сооружение СЭС. По условиям договора на объекте были применены фотоэлектрические модули (ФЭМ) отечественного производителя ГК «Хевел», а степень локализации в целом по станции была достигнута около 70%.

## 2 Основные технические решения

Проектирование, строительство, монтаж, пусконаладочных работ СЭС выполняло ООО «Авелар Солар Технолоджи», структурное подразделение ГК «Хевел». Основное оборудование – гетероструктурные двухсторонние ФЭМ российского производителя HVL 72GG395BB (Новочебоксарск) со следующими основными характеристиками: номинальная мощность 395 Вт; количество ячеек – 72; номинальная рабочая температура 38,8°C; напряжение холостого хода 53,18 В; ток короткого замыкания 9,21 А; КПД 19,75%; габариты 1996x1002x30мм.

Основные проектные решения определялись доступными площадками ТЭЦ площадью 3,5 га. Общее число ФЭМ (5948 шт.) было распределено на два гелиополя. Первое из них смонтировано на бывшем угольном поле (4652 шт.) на опорах над поверхностью земли, второе – над бывшим подземным мазутохранилищем (1296 шт.) на таких же опорах. Инверторы, трансформаторы, автоматика, приборы были размещены в отдельно стоящем модуле. На рис.1 представлен общий вид СЭС. Гелиополя состоят из блоков ФЭМ четырехрядного исполнения по 12 шт. в ряду, всего 48 шт. На рис. 2 представлена схема электрических соединений блока модулей. Ориентация ФЭМ южная, угол наклона к горизонту 32°. ФЭМ смонтированы в надземном варианте на металлических опорах. Принципиальная электрическая схема СЭС приведена на рис. 2. Всего на станции установлено 9 инверторов: семь для ФЭМ гелиополя № 1 и два – гелиополя № 2.

Вырабатываемая электрическая энергия выдается по линии 35 кВ в региональную энергосистему через счетчик СЭГ-4ТМ.03\_3М. В структуре затрат СЭС по аналогичным объектам ГК «Хевел» основными составляющими являются стоимости ФЭМ (60-70%) и инверторов (15-17%).



Рис. 1. Гелиополе Краснодарской ТЭЦ

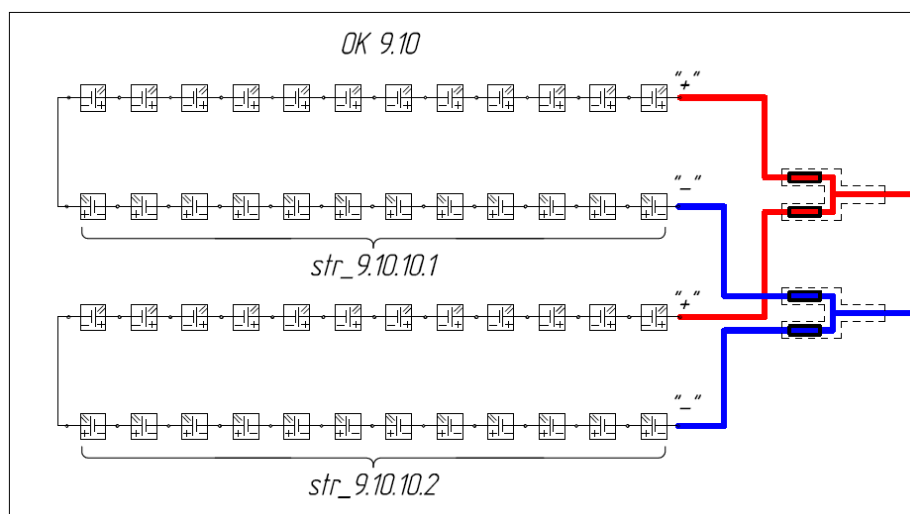


Рис.2. Схема электрических соединений блока ФЭМ

В таблице 1 и на рис. 2 представлены значения плановой и выработанной электрической энергии, а также собственные нужды СЭС в 2023 г. В таблице 2 и на рис. 3 – аналогичные значения в 2024 г. После завершения строительства в 2022г в оставшиеся месяцы было выработано 380698 кВт·ч, а всего с момента сдачи в

эксплуатацию до 01.01.2025 г. – 6372245 кВт·ч. Выработанная СЭС электрическая энергия отпускается в энергосистему по одноставочному тарифу для компенсации потерь в электрических сетях, утвержденному Департаментом государственного регулирования Краснодарского края: в 2022 г. – 16,47 руб/кВт·ч; 2023г – 16,079 руб/кВт·ч; 2024 г. – 16,062 руб/кВт·ч. Таким образом общая выработка СЭС с 2022 г. по 01.01.2025 г. составила 99494,197 (99,5 млн. руб).

Таблица 1. Основные показатели работы СЭС в 2023 г.

Месяц	Электрическая энергия			
	Фактическая кВт·ч	Плановая, кВт·ч	Фактическая, % от плановой	Собств. нужды, кВт·ч
январь	176 054	121 630	144,8	1 815
февраль	110 407	166 660	66,3	1 658
март	183 363	235 046	78,0	1 732
апрель	253 921	312 980	81,1	1 735
май	302 868	375 075	80,8	1 949
июнь	367 476	346 071	106,2	2 056
июль	385 088	364 646	105,6	2 249
август	356 798	370 295	96,4	2 273
сентябрь	345 84	311 548	111,0	2 159
октябрь	254 819	233 561	109,1	2 052
ноябрь	124 830	155 869	80,1	1 869
декабрь	68 146	106 875	64,0	2 023
<b>ИТОГО</b>	<b>2 929 619</b>	<b>3 100 256</b>	<b>93,6</b>	<b>23 569</b>

Таблица 2. Основные показатели работы СЭС в 2024 г.

Месяц	Электрическая энергия			
	Фактическая кВт·ч	Плановая, кВт·ч	Фактическая, % от плановой	Собств. нужды, кВт·ч
январь	94 457	121 057	78,0	2 057
февраль	188 917	166 077	113,8	1 809
март	140 113	233 640	60,0	1 062
апрель	350 406	311 366	112,5	1 973
май	387 413	372 666	104,0	1 949
июнь	413 075	343 779	120,2	2 410
июль	369 267	362 716	101,8	2 869
август	364 372	368 349	98,9	2 716
сентябрь	335 872	309 802	108,4	2 431
октябрь	202 321	232 328	87,1	1 771
ноябрь	124 649	154 946	80,5	1 831
декабрь	91 067	106 305	85,7	1 998
<b>ИТОГО</b>	<b>3 061 930</b>	<b>3 083 031</b>	<b>95,9</b>	<b>24 875</b>



Как следует из таблиц 1 и 2, собственные нужды СЭС составляют 0,8 %. В 2023 г. среднее отклонение плановой и фактической выработки составило 93,6%, а в 2024 г. – 95,9 %. Для совершенствования планирования ведется обработка часовых значений за 2023-2024 гг. Значения КИУМ в 2023 составили: плановое – 15%, фактическое – 14,2%, а в 2024 плановое и фактическое – 14,9%.

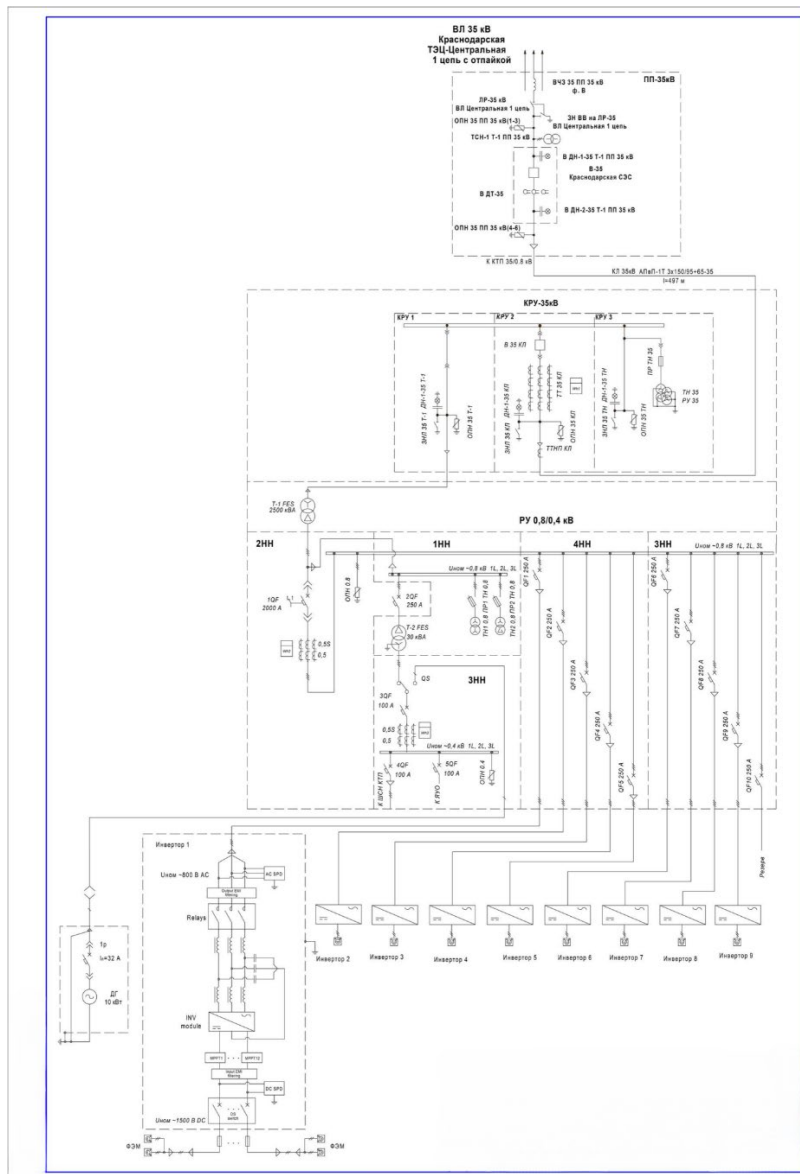


Рис.3. Принципиальная электрическая схема СЭС

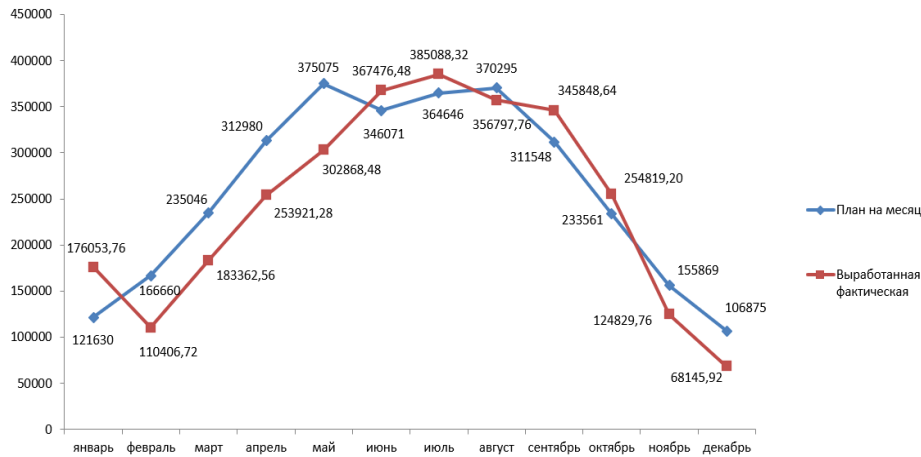


Рис. 4. Графики выработанной и плановой электрической энергии в 2023 г., кВт·ч

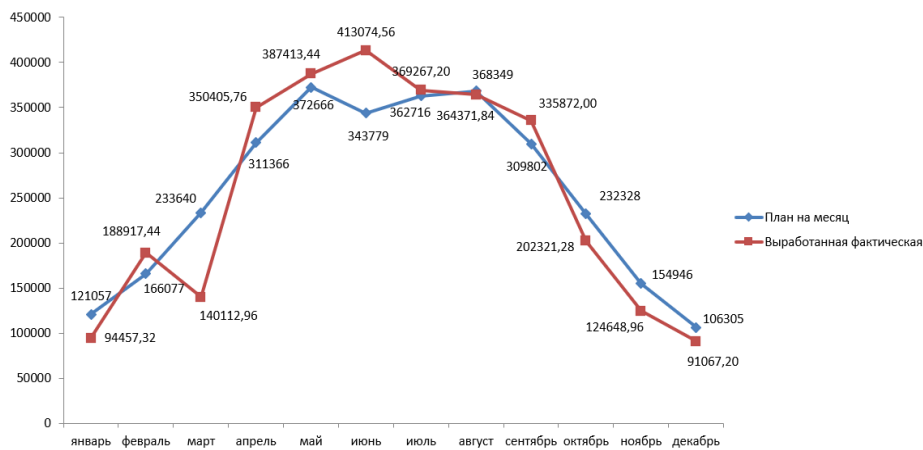


Рис. 5. Графики выработанной и плановой электрической энергии в 2024 г., кВт·ч

Надежность работы оборудования СЭС оценивается владельцем как высокая. Основные отказы имели место в первый год эксплуатации. Для уменьшения загрязнения ФЭМ птицами дополнительно установлены электронные отпугиватели. Из 5948 шт. ФЭМ за 2 года эксплуатации были замены только три модуля (механические повреждения при эксплуатации). Основной прибор диагностики ФЭМ – тепловизор, выявлялись факты перегрева соединительных разъемов модулей MC4-У и с последующей заменой по гарантии. Вся партия инверторов типа KENUA (Китай) (9 шт.) была также заменена по гарантии. Причины: отказ систем управления (3 шт.); КЗ инвертора (4 шт.), отказ вентилятора (1 шт.). Определенные проблемы были с муфтами силовых питающих кабелей инверторов (замена и протяжка). После замены инверторов программа Wisolar Plus для Android и

Windows платформ позволяет диагностировать их состояние по стандартному протоколу Modbus.

Основные эксплуатационные расходы СЭС с учетом ремонтов, технического обслуживания оборудования, материалов определены по соответствующим нормам и коммерческим предложениям поставщиков и составили в 2023 г. – 3403 тыс. руб., в 2024 г. – 3408 тыс. рублей (соответственно, 1448 и 1450 руб./кВт установленной мощности).

### 3 Выводы

СЭС за 2023-2024 гг. обеспечивала надежную выработку электрической энергии с достаточно высоким значением прогнозирования (94-96%).

Эксплуатационная надежность оценивается как высокая после выполнения в первый год работ по соединителям ФЭМ и инверторам. Стоимость работ и материалов обслуживания составляет около 7% в год от выработанной электрической энергии.

Общая стоимость выработанной электрической энергии от ввода в эксплуатацию в 2022 г. до 01.01.2025 г. составила 99,5 млн. руб. при предварительной сметной оценке сооружения СЭС 230 млн. руб.

Фактические значения КИУМ составили в 2023г – 14,2%, а в 2024г – 14,9%.

### Литература

1. Шапошников В.В., Кочерян Е.В., Батько Д.Н., Шелест Н.А. Исследования работы паротурбинного энергоблока при сжигании природного газа в чистом кислороде с целью обеспечения декарбонизации за счет модернизации газового тракта (на примере парового котла ТГМ-94 (ЕП-500/140)) // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 4 (64), 2024, С. 91-103
2. Бутузов В.А. Российская солнечная электроэнергетика // Окружающая среда и энергоснабжение. 2020. № 2. С. 10-15
3. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В., Попель О.С., Филиппов С.П. Анализ перспективных для строительства солнечных электростанций районов России с учетом ресурса солнечной энергии и нестабильности ее поступления // Вестник ОИВТ РАН. № 13 (2024), с. 1-6
4. Бутузов В.А., Гришин В. Комбинированное энергоснабжение предприятия от региональной энергосистемы и собственной солнечной и газовой генерации // Энергетическая политика. 2025. № 1. С. 24-31

### References

1. Shaposhnikov V.V., Kocheryan E.V., Batko D.N., Shelest N.A. Studies of the operation of a steam turbine power unit when burning natural gas in pure oxygen in order to ensure decarbonization by modernizing the gas path (using the example of a steam boiler TGM-94

- (EP-500/140). *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*, 2024, no. 4 (64), pp. 91-103 (in Russ.).
2. Butuzov V.A. Russian solar electric power industry. *Environmental Earth and Energy Study*, 2020, no. 2. pp. 10-15 (in Russ.).
  3. Frid S.E., Lisitskaya N.V., Popel O.S., Filippov S.P. Analysis of promising regions of Russia for the construction of solar power plants, taking into account the resource of solar energy and the instability of its supply. *Vestn. OIVT RAN*, 2024, no. 13, pp. 1-6 (in Russ.).
  4. Butuzov V.A., Grishin V. Combined energy supply of the enterprise from the regional energy system and its own solar and gas generation. *Energeticheskaya politika*, 2025. no. 1., pp. 24-31 (in Russ.).

## **Solar Grid Power Plant of Krasnodar CHPP in the Retail Market of the Regional Energy System in 2023-2024**

<sup>1,1</sup> Yaroslav Beze, <sup>2,2</sup> Valentin Shaposhnikov, <sup>2,3</sup> Evgeny Kocharyan,  
<sup>3,4</sup> Butuzov Vitaly

<sup>1</sup>Lukoil-Kuban'Energo JSC,

<sup>2</sup>Kuban' State Technological University, Krasnodar, Russia.

<sup>3</sup>Kuban' State Agricultural University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

E-mail: <sup>1</sup> yaroslav.beze@lukoil.com,  
<sup>2</sup> shaposhnikov.valentin@gmail.com,  
<sup>3</sup> kocha99@mail.ru, <sup>4</sup> ets@nextmail.ru

**Abstract.** For the region's first grid-based solar power plant (SES) Krasnodarskaya CHPP with a peak capacity of 2.35 MW, built in 2022 on the basis of photovoltaic modules (FEM) by Hevel Group, the main technical solutions are described, basic electrical diagrams of a typical FEM unit and the SES as a whole, the results of planned and actual generation, own station needs in 2023, 2024. The main equipment failures are described. Estimates of the cost of the generated electric energy and maintenance work are given.

**Keywords:** photovoltaic modules (FEM), solar power plant (SES), inverter, solar field, PDM, single-rate tariff.

УДК 911.3:332.1:622+620.9+316.3

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-29-51

EDN: GYSUMA

## Геотории: георесурсы, геоэнергетика, геоинфраструктура

<sup>1,1</sup> Бушуев Виталий Васильевич [0000-0001-9288-4699],  
<sup>1,2</sup> Клепач Андрей Николаевич [0000-0002-4175-4701],  
<sup>1,3</sup> Соловьев Дмитрий Александрович [0000-0001-5591-3067]

<sup>1</sup>Институт энергетической стратегии, г. Москва, Россия,  
<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Экономический факультет, г. Москва, Россия,  
<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: <sup>1</sup> vital@guies.ru, <sup>2</sup> hvv@inveb.ru,  
<sup>3</sup> solovev@ocean.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается концепция «геоторий» – особых пространственных единиц, которые формируются на основе природного, экономического и социогуманитарного потенциала и обеспечивают как собственное хозяйственное развитие регионов, так и их интеграцию с соседями в общее «организованное пространство» Евразии. Геотории отличаются от традиционных административно-территориальных единиц и пространственных кластеров за счёт приоритета природных факторов, обусловленных географическими и космопланетарными процессами, а также фактором целостности, а не специализации. Рассматривается ресурсный потенциал геоторий (минеральные, водные, биологические и энергетические ресурсы), определяющий их специализацию и конкурентные преимущества. Особое внимание уделяется экспортноориентированным геоториям (в том числе Кузбасса, Сахалина и Якутии). Геотории рассматриваются как узлы сетцентрической инфраструктурной модели «Большой системы», которые организуют общее пространства Евразии через реализацию своего природного, научного, экономического, социогуманитарного и управленческого потенциала.

**Ключевые слова:** геотории России, ресурсы, инфраструктура, устойчивое экономическое и социогуманитарное развитие, сетцентрическая модель организации пространства Евразии.

## Введение

Геотория представляет собой уникальную пространственную единицу, характеризующуюся достаточным природным потенциалом для обеспечения автономного хозяйственного развития [1]. Геотории можно рассматривать как локальные узлы устойчивого развития, играющие роль ресурсных, производственных и управленческих центров в глобальной экономике. Они выполняют ключевую функцию в инфраструктурной интеграции соседних регионов, обеспечивая поставку ресурсов, энергоснабжение и транспортную связанность.

Образно говоря, геотории — это своего рода «оазисы» земной ойкумены, исторически сформировавшиеся как поселения при наличии достаточных условий для проживания и хозяйственной деятельности местного населения.

Основными особенностями геоторий являются наличие природных ресурсов, включающих минеральные, энергетические, водные и биологические запасы, а также относительно автономная хозяйственная деятельность, основанная на комплексном использовании этих ресурсов и их преобразовании в сопряжённое промышленное, аграрное и логистико-инфраструктурное развитие. Геотории выступают в качестве опорной территории, которая характеризуется не только высокой концентрацией ресурсов, но и способностью быть центром развития для соседних, тяготеющих к ней территорий. Они играют интеграционную роль, выступая связующими узлами для объединения соседних регионов через транспортные, энергетические и экономические потоки. Их географическое положение, как правило, определяется стратегически важными зонами, такими как речные бассейны, горные массивы и области с высоким содержанием природных ресурсов. Кроме того, высокая инфраструктурная обеспеченность, включающая транспортные и энергетические коммуникации, промышленные зоны и научные центры, делает геотории важными узлами территориального развития.

Ниже приведён пример схематического изображения (рис. 1) структуры геоторий как интеграционных узлов, показывающий взаимосвязь между ресурсными и промышленными кластерами, а также ключевыми инфраструктурными элементами и научно-образовательными центрами.

Ресурсные кластеры представляют собой зоны, где сосредоточены месторождения полезных ископаемых, водные и биологические ресурсы, а также предприятия первичного добывающего сектора. Эти кластеры, помимо собственного использования, обеспечивают поставку сырья и энергоресурсов — таких как уголь, нефть, газ, руда, древесина и другие материалы — в соседние регионы.

Геотория выступает интеграционным узлом, связывающим добывающие предприятия с промышленными кластерами. В этом центре расположены ключевые инфраструктурные объекты, включая транспортные хабы, энергетические подстанции и логистические центры. Здесь осуществляется управление потоками ресурсов и обеспечивается взаимодействие с региональными и глобальными рынками.

Промышленные кластеры объединяют предприятия перерабатывающих отраслей, занимающиеся выпуском продукции с высокой добавленной стоимостью.

Научно-образовательный центр играет роль генератора инноваций, обеспечивая подготовку кадров и развитие научных исследований как фундаментального, так и прикладного характера. Он взаимодействует с промышленными кластерами, внедряя новые технологии, а также с собственной и другими геотериями, способствуя их стратегическому развитию.

Инфраструктура, включающая транспортные, энергетические и цифровые сети, обеспечивает функционирование всех элементов геотерии. Если рассматривать геотерию как относительно автономные системы, то, по-видимому, интенсивность внутренних связей между кластерами геотерии должна быть выше интенсивности внешних связей. Однако большинство кластеров Сибири и Дальнего Востока, напротив, характеризуются более мощными потоками грузов и коммуникаций с внешними центрами, особенно мировыми, чем потоками ресурсов внутри России.

Социогуманитарная среда и рынок труда формируются вокруг геотерии и включают жилые районы, социальные и экологические объекты, культурные и духовные учреждения, а также местное население. Их развитие зависит от состояния инфраструктуры и активности промышленного сектора. Эти факторы играют ключевую роль в обеспечении региона квалифицированными кадрами и поддержании социальной стабильности.

Данная схема демонстрирует, как геотерия выступает узловым звеном в процессе преобразования природных ресурсов в конечную продукцию, интегрируя добывающие отрасли и перерабатывающие производства. Научная и образовательная среда совместно с развитой инфраструктурой обеспечивает долгосрочное развитие и конкурентоспособность всего комплекса.



Рис. 1. Схематическое изображение геотерии как интеграционных узлов

Выполняя роль «опорных точек» в организации пространственного развития экономики, геотории с помощью сетевой инфраструктуры связывают локальные территории в единые хозяйственные системы, формируя транспортно-промышленные комплексы (ТПК), энергетические кластеры и инновационные зоны. К числу успешных примеров формирования геоторий можно отнести гидроэнергетические комплексы, такие как Волжские и Енисейские ГЭС, которые служат центрами энергетической независимости и промышленного роста. Кузбасс является ведущей угледобывающей геоторией, обеспечивающей как внутренний рынок, так и экспортные поставки энергоресурсов [2]. Байкальская геотория представляет собой уникальное сочетание ресурсного потенциала, включающего водные запасы, гидроэнергетику и лесные богатства, с высокой экологической ценностью региона. Дальневосточные геотории, такие как Якутия и Сахалин, играют ключевую роль в добыче нефти и газа и являются важными узлами для экспорта энергоресурсов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона [3].

По-видимому, следует говорить о двух типах геоторий: интегрированные центры, или кластеры с высокой интенсивностью внутренних связей, и геотории-регионы сетевого типа, в которых преобладают внешние потоки ресурсов и услуг.

## 1 Геокосмические факторы формирования геоторий

Геотории, как уникальные пространственные образования, формируются под воздействием космопланетарных процессов, определяющих структуру ландшафтов, климатические условия, распределение природных ресурсов и геоэнергетический потенциал регионов. Согласно концепции фрактального подобия, представленной в работе [4], геотории можно рассматривать как земные аналоги космических структур, что подчёркивает их энергоинформационную взаимосвязь с глобальными процессами.

Геологическая и климатическая эволюция Евразии обусловлена множеством космопланетарных факторов, включая солнечную активность и космическое излучение, которые оказывают влияние на температурные режимы, динамику ледниковых периодов и гидрометеорологические циклы. Гравитационное воздействие Луны определяет ритмику приливных и сейсмических процессов, а также циркуляцию водных масс. Магнитное поле Земли влияет на миграцию заряженных частиц, формирование геофизических аномалий и распределение рудных месторождений. Глобальные тектонические процессы, связанные с перемещением литосферных плит, образованием горных систем, разломов и геотермальных зон, также играют важную роль. Все эти процессы формируют геопропространственную организацию природной структуры Евразии, определяя расположение бассейнов полезных ископаемых, зон активного вулканизма, речных систем и климатических поясов.

В исследованиях [2]–[4] подчёркивается, что геотории являются не только географическими, но и энергетическими узлами Земли. Они аккумулируют и пере-



распределяют космическую и геофизическую энергию, формируя энергонасыщенные территории, обладающие природными ресурсами и климатическим потенциалом для хозяйственной деятельности. Среди основных видов энергетического потенциала геотермальных ресурсов можно выделить геотермальную энергию, сосредоточенную в зонах тектонических разломов и вулканической активности, таких как Камчатка, Курильские острова и Байкальский рифт. Существенное значение имеет гидроэнергетический потенциал рек, сформированных тектоническими процессами, например, Енисей, Лены и Амура. Минеральные ресурсы, в частности рудные и углеводородные месторождения, залегают в зонах геологической активности, таких как Кузбасс, Западная Сибирь и Сахалин. Климатические ресурсы, включая солнечную и ветровую энергию, определяются циркуляцией воздушных масс и наиболее проявлены в регионах Северного Причерноморья, Поволжья и Прикаспийского региона.

Понимание геокосмических факторов формирования геотермальных ресурсов позволяет выработать эффективные стратегии рационального использования природных ресурсов и устойчивого территориального развития в рамках местной инфраструктурной организации пространства, не прибегая к централизованному управлению. В частности, энергетическое развитие может учитывать природные механизмы аккумуляции и преобразования энергии, такие как геотермальная и солнечная генерация. Геоинфраструктура должна быть адаптирована к тектоническим рискам и особенностям климатических зон, а ресурсопользование — направлено на достижение баланса между воспроизводимыми и невозобновимыми энергопотоками.

Таким образом, геотермальные ресурсы — это не просто способные к самостоятельному существованию территориальные образования, а сложные энергоинформационные системы, развивающиеся в результате многовекового взаимодействия планетарных и космических процессов, а также социально-экономической и социогуманитарной деятельности местного населения.

## 2 Природный потенциал геотермальных ресурсов

Природный потенциал геотермальных ресурсов определяется совокупностью факторов, включающих территориальные особенности, ландшафт, запасы недр, климатические и демографические ресурсы, социальный капитал, исторический опыт освоения, а также экономическую и технологическую базу использования и восполнения ресурсов.

Геотермальные ресурсы представляют собой обособленные территории, обладающие устойчивым природно-ресурсным потенциалом. Территориальная организация геотермальных ресурсов основывается на природных и экономических характеристиках, определяющих их специализацию. Например, Байкальская геотермальная территория сочетает в себе уникальные водные ресурсы, запасы лесных массивов и рекреационный потенциал, что делает её центром экологического туризма и природоохранных инициатив [3]. В свою очередь, Сахалинская геотермальная территория является стратегическим центром

нефтегазодобычи, обеспечивающим энергетическую безопасность региона и страны в целом [3].

Ландшафтные особенности геотерий формируются под влиянием тектонических процессов и климатических условий. Так, горные районы Алтайской геотерии обладают высоким потенциалом для развития туризма и агропромышленного производства, однако требуют значительных инфраструктурных инвестиций [2]. Водно-болотные экосистемы Приамурской геотерии играют ключевую роль в сохранении биоразнообразия региона и могут быть использованы для экологически ориентированного хозяйствования [2].

Запасы недр геотерий различаются по видам и степени освоенности. Крупнейшие месторождения угля сосредоточены в Кузбассе, а рудные полезные ископаемые добываются в Магаданской геотерии. Арктическая Чукотская геотерия богата углеводородами и редкоземельными металлами, перспективными для развития высокотехнологичного производства.

Климатические и демографические ресурсы играют важную роль в развитии геотерий. В районах с суровым климатом, таких как Магаданская и Чукотская геотерии, плотность населения крайне низкая, что затрудняет освоение территорий и требует применения специализированных технологий для строительства и обеспечения инфраструктуры. В то же время регионы с благоприятными климатическими условиями, например Приморская геотерия, обладают значительным потенциалом для привлечения мигрантов и развития сельского хозяйства.

Социальный капитал является важным фактором развития геотерий (рис. 2). Например, в Байкальской геотерии уровень социального капитала выше среднего, что способствует развитию науки, образования и туристической индустрии. В отличие от этого, в Магаданской геотерии доминируют трудоёмкие отрасли, такие как горнодобывающая промышленность, что снижает уровень социального капитала.

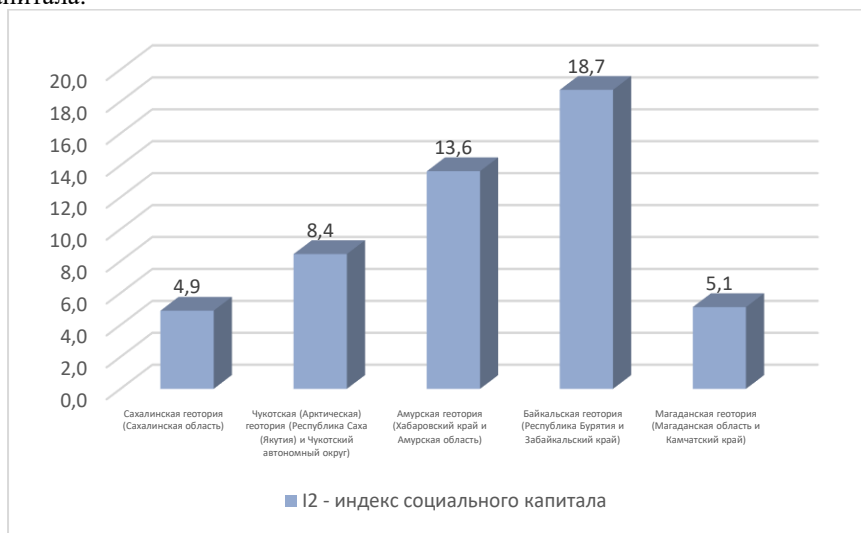


Рис. 2. Средние значения индекса социального капитала для геотерий ДФО России [3]

Исторический опыт освоения геотерий показывает, что их развитие во многом определялось государственными инвестициями и инфраструктурными проектами. Примером служит программа комплексного освоения Дальневосточных территорий, включающая развитие транспортных коридоров, энергетики и добывающей промышленности [5].

Экономическая и технологическая база геотерий варьируется в зависимости от их специализации. В Кузбассе и Якутии преобладает добывающая промышленность, ориентированная на экспорт энергоресурсов. В Новосибирской и Иркутской геотериях развиваются высокотехнологичные производства и научные кластеры.

Создание социопроизводственных кластеров в геотериях позволяет эффективно интегрировать различные отрасли экономики и развивать устойчивую инфраструктуру. Байкальская геотерия может стать центром экологически чистого производства и туризма, а Магаданская — точкой роста для развития арктической логистики и добычи полезных ископаемых [3]. Внедрение новых технологий, таких как возобновляемая энергетика и цифровые платформы управления ресурсами, позволит повысить экономическую эффективность геотерий и сократить их зависимость от традиционных индустриальных моделей.

Таким образом, природный потенциал геотерий включает в себя широкий спектр факторов, определяющих их развитие. Развитие территориальных, природных, социальных и человеческих ресурсов в сочетании с инновациями в инфраструктуре и экономике создаёт условия для устойчивого роста и интеграции геотерий в глобальную хозяйственную систему.

### **3 Опыт создания геотерий в виде ТПК**

Опыт создания геотерий в виде территориально-производственных комплексов (ТПК) в СССР представляет собой значимый этап в развитии отечественной промышленности и энергетики. ТПК объединяли в себе промышленные предприятия, энергетические объекты и инфраструктуру, способствуя комплексному освоению природных ресурсов и развитию регионов. Примерами таких геотерий являются территориально-промышленные комплексы, сформированные на базе Волжских и Енисейских гидроэлектростанций, а также Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) и Западно-Сибирского нефтегазового комплекса (ЗСНГК).

Волжская ГЭС стала центром обеспечения надёжности Единой энергетической системы СССР. Однако, помимо своего отраслевого значения, она сыграла важную роль в организации пространственного развития Урало-Поволжской зоны. Вокруг Волжской ГЭС сформировался территориально-производственный комплекс, включающий промышленные предприятия, транспортные узлы и насе-

лённые пункты. В частности, город Тольятти стал крупным центром автомобильной, электротехнической и нефтехимической промышленности, что способствовало экономическому развитию не только Поволжья, но и всей страны.

Красноярская ГЭС, построенная на реке Енисей в 1955–1972 годах, на момент ввода в эксплуатацию была самой мощной в мире. Она обеспечила энергией крупные промышленные предприятия Красноярского края, включая алюминиевые и электротехнические заводы, что способствовало промышленному развитию региона. Однако изменение гидрологического режима реки привело к экологическим последствиям, включая изменение микроклимата и повышение уровня заболеваемости населения [7].

Аналогичные процессы наблюдались и в других ТПК Ангаро-Енисейского каскада ГЭС.

Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс (КАТЭК) был создан для комплексного освоения богатых запасов бурого угля Канско-Ачинского бассейна. В рамках КАТЭКа были построены крупные угольные разрезы, тепловые электростанции и предприятия по переработке угля. Комплекс обеспечивал энергией значительную часть Сибири и способствовал развитию энергетической независимости страны.

Западно-Сибирский нефтегазовый комплекс (ЗСНГК) стал основой нефтегазовой промышленности СССР. В его рамках были освоены крупнейшие месторождения нефти и газа в Тюменской области, построены трубопроводы, перерабатывающие заводы и инфраструктура для экспорта углеводородов. ЗСНГК сыграл ключевую роль в обеспечении страны энергоресурсами и развитии экспортного потенциала.

Таким образом, создание геоторий в форме ТПК способствовало комплексному освоению природных ресурсов, развитию промышленности и инфраструктуры, а также укреплению экономического потенциала страны. Однако реализация таких проектов требовала тщательного учёта экологических и социальных факторов для обеспечения устойчивого развития регионов, а также централизации значительных инвестиционных ресурсов, что было возможно лишь в условиях централизованного управления, реализуемого через систему Госплана СССР.

В современных условиях необходим поиск иных моделей освоения пространств Евразии — путём формирования ТПК на базе местных геоторий и их самостоятельной интеграции с соседними территориями с учётом совместных интересов и общих возможностей.

#### **4 Экспортно ориентированные геотории и опыт их освоения на основе СРП**

Экспортно-ориентированные геотории России в Сибирском (СФО) и Дальневосточном (ДФО) федеральных округах, в состав которых входят Кузбасс, Якутия и Сахалин, играют ключевую роль в обеспечении страны минеральными и энергетическими ресурсами, а также в формировании её экспортного потенциала. Их освоение, особенно в контексте соглашений о разделе продукции (СРП), позволило бы привлечь значительные инвестиции и стимулировать экономический рост регионов [8], [9].

Кузбасс является одним из крупнейших угольных бассейнов России и мира. Уголь, добываемый в этом регионе, экспортируется в различные страны, включая Китай, Японию и Южную Корею, а также через восточные порты России. Развитая транспортная инфраструктура, включая железнодорожные магистрали и портовые комплексы, делает Кузбасс важным звеном в угольной отрасли страны. Для этого региона критически важна модернизация логистической системы, поскольку увеличение объёмов экспорта требует развития транспортных мощностей и энергетической инфраструктуры.

Якутия обладает богатейшими природными ресурсами, включая золото, алмазы, нефть, газ и уголь. Внутренними потребителями части экспортируемой продукции являются Красноярский край, Иркутская область, Амурская область и Хабаровский край. Добыча и переработка этих ресурсов требует значительных капиталовложений, однако экспортная ориентация региона создаёт возможности для привлечения инвестиций, в том числе в освоение новых месторождений и развитие инфраструктуры.

Сахалинская геотория является стратегическим центром нефтегазодобычи России благодаря реализации крупных проектов «Сахалин-1» и «Сахалин-2». Эти проекты осуществляются с привлечением иностранных партнёров на основе соглашений о разделе продукции (СРП), что позволило мобилизовать значительные зарубежные инвестиции, особенно со стороны китайских компаний. Механизм СРП способствовал ускоренному освоению месторождений, созданию необходимой инфраструктуры и росту экспорта природного газа и нефти в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР) в течение следующих 30 лет станет основным потребителем энергоресурсов в мире [10]. Значительная часть этого спроса будет удовлетворяться за счёт традиционных источников энергии. В связи с этим Россия планирует расширение своей ресурсной базы на Дальнем Востоке с целью удовлетворения растущего спроса в АТР.

Благодаря реализации проектов в рамках СРП [8], Сахалинская область занимает пятое место в российском рейтинге по сводному индексу социально-экономического положения; третье место — по развитию реального сектора экономики; шестое — по показателям инвестиционной привлекательности; двенадцатое — по уровню доходов и занятости населения. Валовой региональный продукт

Сахалинской области в два раза превышает средний показатель по Дальневосточному федеральному округу, а доходы — в 1,5 раза. С 1996 года валовой региональный продукт вырос с 9,6 до 455,2 млрд руб.; по объёму ВРП на душу населения область занимает третье место в России. За тот же период добыча нефти на Сахалине увеличилась почти в 9 раз, а газа — в 13,2 раза. Только в нефтегазовом секторе экономики Сахалинской области накоплено иностранных инвестиций на сумму 32,6 млрд долларов США. Построен первый в России и один из крупнейших в мире завод по сжижению природного газа.

В целом, применение механизма СРП в Сахалинской геотории продемонстрировало его эффективность для привлечения иностранных инвестиций, технологического обмена и формирования экспортно-ориентированной экономики. Опыт Сахалина может быть использован и в других геоториях Дальнего Востока, что позволит сочетать внутренние и внешние потребности, а также повысить устойчивость экономики к внешним шокам [9].

В контексте «разворота» энергетической стратегии геоторий ДФО на Восток, опыт СРП в Сахалинской геотории может быть реализован по следующим направлениям [3], [12]:

**Привлечение китайских инвестиций.** Успешная реализация СРП с участием китайских компаний на Сахалине может стать моделью для привлечения инвестиций из КНР в другие геотории ДФО. Это будет способствовать развитию инфраструктуры, созданию новых проектов и стимулированию экономического роста.

**Обмен технологиями.** В рамках СРП возможна двусторонняя передача технологий и опыта между российскими и китайскими компаниями, что способствует развитию технологического потенциала и повышению эффективности добычи и использования природных ресурсов.

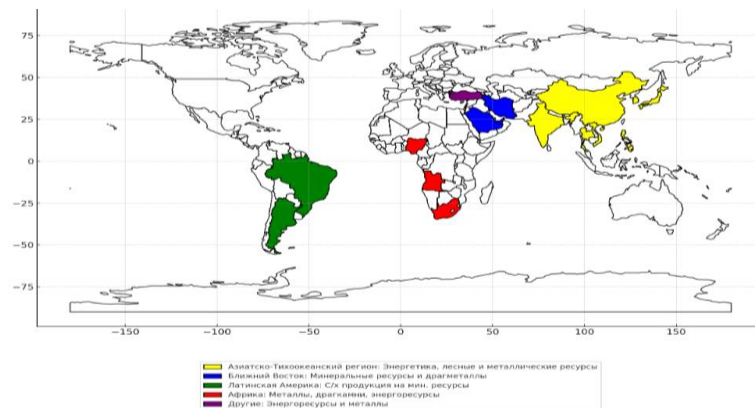
**Развитие экспортных возможностей.** СРП может способствовать расширению экспортного потенциала ресурсов, добываемых в геоториях ДФО. Китай, как крупнейший потребитель энергии и сырья, является стратегическим партнёром в данном направлении.

**Содействие развитию энергетической инфраструктуры.** СРП может стать инструментом для расширения энергетической инфраструктуры в регионах ДФО. Китай обладает опытом в проектировании и строительстве энергетических объектов, включая гидроэлектростанции, тепловые станции, сети передачи и инфраструктуру для освоения геотермальной энергии.

**Создание новых рабочих мест и развитие экономики.** Реализация проектов СРП с китайскими партнёрами способна способствовать созданию новых рабочих мест, что положительно скажется на уровне жизни населения и общем социально-экономическом развитии регионов.

**Повышение энергетической безопасности.** Сотрудничество в рамках СРП с КНР способствует диверсификации энергетических поставок, укреплению энергетической независимости и снижению рисков, связанных с импортом энергоресурсов.

Внешнее потребление ресурсов геотермальных ДФО России может быть разнообразным и ориентировано на различные международные рынки, особенно с учётом текущих санкционных ограничений со стороны западных стран (рис. 3).



**Рис. 3.** Потенциальные внешние потребители ресурсов геотермальных ДФО России на карте Мира,[13]

Таким образом, экспортно-ориентированные геотермальные ДФО России демонстрируют успешный опыт освоения природных ресурсов, развитие которых во многом зависит от масштабных инфраструктурных проектов, внешнеэкономических связей и применения современных механизмов, таких как соглашения о разделе продукции.

## 5 Научное и социогуманитарное обеспечение геотермального развития

Научное и социогуманитарное обеспечение геотермального развития в Сибири и на Дальнем Востоке России опирается на сеть научных центров, рекреационных зон и этнокультурных учреждений, способствующих комплексному развитию регионов.

Новосибирский Академгородок [14] является ведущим научным центром Сибири, объединяющим множество исследовательских институтов, таких как Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, Институт катализа им. Г. К. Борескова и другие. Эти учреждения занимаются передовыми исследованиями в области физики, химии, биологии и информатики, внося значительный вклад в научно-технический прогресс страны.

Иркутский научный центр Сибирского отделения РАН сосредоточен на изучении природных ресурсов и экосистем Байкальского региона. Исследования в области геологии, экологии и биологии способствуют сохранению уникальной природы озера Байкал и устойчивому развитию прилегающих территорий.

Якутский научный центр осуществляет исследования в области мерзловедения, алмазоведения и адаптации человека к экстремальным условиям Севера. Эти научные направления имеют важное значение для освоения северных территорий и улучшения качества жизни местного населения.

Дальневосточный научный центр ориентирован на изучение природных ресурсов и биоразнообразия Дальнего Востока. Исследования в области океанологии, биологии и сельского хозяйства способствуют развитию рыбного промысла, аграрного сектора и сохранению экосистем региона.

Байкальская рекреационная зона привлекает туристов своими уникальными природными ландшафтами и культурным наследием. Развитие экологического туризма и создание туристско-рекреационных комплексов способствуют экономическому росту региона и сохранению его природного потенциала.

Алтайская рекреационная зона известна своими горными ландшафтами, чистыми реками и богатым культурным наследием. Развитие туризма в этом регионе способствует сохранению традиций и обычаев местных народов, а также стимулирует экономическое развитие территории.

Этнические и духовные центры — играют важную роль в консолидации местного населения [15]. Они способствуют сохранению культурного наследия, укреплению социальной сплочённости и развитию межкультурного диалога.

Таким образом, сочетание научных исследований, развитие рекреационных зон и поддержка этнокультурных центров обеспечивают комплексное геотерриториальное развитие, способствуя устойчивому экономическому росту и сохранению культурного и природного наследия регионов.

## **6 Состояние и перспективы освоения геотерриторий Сибири**

Сибирский федеральный округ (СФО) занимает около 25 % территории России и включает 10 субъектов Федерации. Регион обладает богатой природно-ресурсной базой, включающей значительные запасы угля, нефти, газа, металлов и древесины. Ведущими отраслями промышленности являются цветная и чёрная металлургия, электроэнергетика, лесная и деревообрабатывающая промышленность, химическая и нефтехимическая отрасли, а также машиностроение и металлообработка.

В 2020 году оборот организаций округа по всем видам экономической деятельности составил 13,3 трлн рублей, что эквивалентно 9,8 % валового регионального продукта (ВРП) страны. Однако индекс промышленного производства продемон-



стрировал снижение на 3,2 % по сравнению с предыдущим периодом, что указывает на необходимость диверсификации экономики и повышения её устойчивости [16].

Перспективы освоения геотермальных ресурсов в СФО связаны с развитием экономики знаний и инновационного сектора [17]. Усиление научно-исследовательской базы, поддержка высокотехнологичных производств и развитие человеческого капитала являются ключевыми направлениями для обеспечения устойчивого роста региона.

Кроме того, СФО обладает значительным потенциалом в области возобновляемых источников энергии, что может способствовать снижению выбросов парниковых газов и улучшению экологической обстановки. Развитие проектов в сфере возобновляемой энергетики, включая ветровые и солнечные электростанции, а также использование биомассы, может стать важным элементом стратегии устойчивого развития округа.

Несмотря на положительные тенденции, экономика СФО сталкивается с рядом вызовов. Основными из них являются высокая зависимость от добывающей промышленности, недостаточно развитая транспортная и энергетическая инфраструктура, необходимость привлечения инвестиций и внедрения инновационных технологий. Существенное значение имеет диверсификация экономики, направленная на снижение рисков, связанных с колебаниями мировых цен на сырьевые ресурсы.

Перспективными направлениями освоения геотермальных ресурсов в СФО являются развитие инновационной экономики, повышение энергоэффективности, модернизация промышленного производства и внедрение передовых технологий. Особую роль играет переход к использованию возобновляемых источников энергии, включая солнечную и ветровую энергетику, что позволяет снизить нагрузку на традиционные источники и уменьшить экологические риски.

Вопрос экологической устойчивости также остаётся актуальным. Интенсивная добыча полезных ископаемых приводит к деградации природных ландшафтов, загрязнению водоёмов и атмосферного воздуха. Разработка экологически чистых технологий, эффективное управление отходами и восстановление лесов должны стать приоритетными мерами экологической политики региона.

Научно-технологическое развитие играет ключевую роль в повышении конкурентоспособности СФО. Новосибирский Академгородок, Иркутский научный центр и другие ведущие научные учреждения обеспечивают региону возможность развивать высокотехнологичные производства, включая биотехнологии, медицинские исследования, робототехнику и цифровую экономику.

Таким образом, текущее состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов в Сибирском федеральном округе требуют комплексного подхода, включающего рациональное использование природных ресурсов, развитие инновационной экономики и улучшение экологической ситуации. Реализация указанных направлений позволит обеспечить устойчивое развитие региона и повысить его вклад в общенациональную экономику.

## 7 Индексы экономического и социогуманитарного развития геоторий СФО

Индексы экономического и социогуманитарного развития геоторий Сибирского федерального округа (СФО) являются важными показателями для оценки уровня благосостояния и устойчивости развития регионов. В основе анализа лежат такие ключевые индикаторы, как валовой региональный продукт (ВРП), уровень жизни населения, состояние инфраструктуры, уровень образования, здравоохранения и экологическая устойчивость.

Экономическое развитие геоторий СФО отражается в динамике ВРП. За последние два десятилетия наблюдается устойчивый рост ВРП большинства регионов округа. Новосибирская область демонстрирует высокие показатели благодаря развитой научно-образовательной базе и диверсифицированной экономике. Кемеровская область (Кузбасс) остаётся лидером по объёмам угледобычи, однако её экономика остаётся уязвимой к колебаниям цен на сырьевые ресурсы.

Социогуманитарное развитие геоторий оценивается с использованием индекса социогуманитарного развития (ИСГРГР), который учитывает уровень образования, доступность медицинских услуг, культурную активность и развитость социальной инфраструктуры. Так, в Новосибирской области высокий уровень ИСГРГ объясняется развитой системой высшего образования и научных исследований, тогда как в отдалённых районах Красноярского края и Республики Тыва фиксируются более низкие показатели вследствие слабой доступности социальных услуг.

Демографические тенденции оказывают значительное влияние на социогуманитарное развитие. В ряде регионов наблюдается снижение плотности населения, обусловленное миграционным оттоком и естественной убылью. Вместе с тем, города Новосибирск и Красноярск демонстрируют прирост численности населения, что связано с наличием рабочих мест, развитой социальной инфраструктурой и более высокими стандартами жизни.

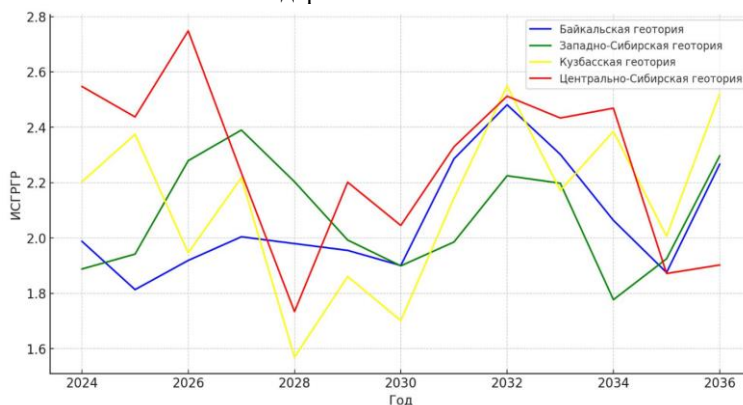


Рис. 4. Прогнозные индексы социогуманитарного развития (ИСГРГР) для отраслевых геоторий Сибири с 2024 по 2036 годы [2]

Согласно прогнозам (рис. 4), дальнейшее развитие геоторий СФО будет зависеть от внедрения инновационных технологий, диверсификации экономики и повышения качества социальной инфраструктуры. Для большинства геоторий 2032 год может стать периодом интенсивного роста, что указывает на ожидаемое улучшение инвестиционного климата и реализацию крупных инфраструктурных проектов. Значимую роль играет экологический фактор: интенсивное освоение природных ресурсов сопряжено с экологическими рисками. Развитие "зелёных" технологий и реализация принципов устойчивого развития способны существенно повысить качество жизни населения.

Таким образом, индексы экономического и социогуманитарного развития геоторий СФО позволяют не только оценивать текущее состояние территорий, но и прогнозировать их долгосрочные перспективы. Укрепление научного потенциала, развитие инфраструктуры и повышение уровня жизни населения являются ключевыми направлениями повышения конкурентоспособности и устойчивости данных территорий.

## **8 Социопроизводственные связи внутри геоторий СФО и целевая направленность их формирования для повышения эффективности использования местных ресурсов**

Социопроизводственные связи внутри геоторий Сибирского федерального округа формируют основу их экономического развития, обеспечивая рациональное использование природных ресурсов и интеграцию промышленных, энергетических и транспортных систем. Важнейшим фактором повышения эффективности ресурсопользования является сбалансированное распределение производственных мощностей, а также развитие кооперационных связей между предприятиями различных отраслей.

Внутренние социопроизводственные связи геоторий СФО базируются на природном потенциале и уровне инфраструктурной доступности. Так, Кузбасс выступает крупнейшим угледобывающим центром, поставляющим сырьё металлургическим предприятиям Красноярского края и Новосибирской области. В свою очередь, металлургические комбинаты обеспечивают переработку сырья, создавая продукцию с высокой добавленной стоимостью и поддерживая устойчивое развитие региона.

Хакасия и Иркутская геотории, обладая значительным гидроэнергетическим потенциалом, обеспечивают поставки электроэнергии для алюминиевых заводов и других энергоёмких производств. Это способствует формированию энергетически автономных промышленных кластеров, интегрированных в единую экономическую систему.

В Байкальской геотории наблюдается особый тип социопроизводственных связей, сочетающий экологически ориентированное производство, рекреационную деятельность и научные исследования. Такой подход позволяет эффективно использовать природные ресурсы без нанесения ущерба экосистемам, обеспечивая долгосрочную устойчивость развития.

Эффективное использование местных ресурсов напрямую связано с уровнем развития транспортной и энергетической инфраструктуры. Развитие железнодорожных коридоров, таких как Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали, способствует активному межрегиональному товарообороту и обеспечивает геоториям выход на внешние рынки.

В энергетической сфере важным направлением является развитие межрегиональных энергосетевых связей, таких как Объединённая энергосистема Сибири, обеспечивающая перераспределение электрической энергии между регионами. Это позволяет оптимизировать энергопотребление, снизить издержки производства и повышать эффективность использования местных ресурсов.

Формирование социопроизводственных связей в геоториях СФО целенаправленно ориентировано на:

- **Диверсификацию экономики** – переход от сырьевой модели к переработке и внедрению инновационных технологий;
- **Формирование кластерных моделей** – объединение технологически связанных отраслей в рамках единой производственной цепочки;
- **Интеграцию в мировую экономику** – развитие экспортно-ориентированных производств и участие в глобальных логистических цепочках.

Примером успешной реализации такого подхода является взаимодействие Сахалинской и Иркутской геоторий, где природные запасы газа используются для производства сжиженного природного газа (СПГ) и его экспорта на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Социопроизводственные связи внутри геоторий СФО играют важную роль в формировании устойчивой экономической модели, обеспечивая эффективное использование местных ресурсов. Развитие транспортной, энергетической и промышленной инфраструктуры, а также диверсификация экономики и внедрение новых технологий способствуют формированию конкурентоспособных территориально-производственных комплексов, интегрированных в общероссийскую и мировую экономику.

На Рис.5 приведён пример схемы, которая иллюстрирует социопроизводственные связи внутри отдельных геоторий СФО, показывая, как природные ресурсы и инфраструктура обеспечивают промышленное развитие, а целевая направленность этих связей способствует диверсификации экономики и интеграции в мировые рынки.



Рис. 5. Иллюстрация социопроизводственных связей внутри отдельных геотерий СФО

## 9 Инфраструктурная взаимосвязь геотерий и их интеграция в Единую систему развития Восточной Евразии

Инфраструктурное развитие геотерий Сибири и Дальнего Востока является стратегически важным направлением для интеграции России в единое экономическое и логистическое пространство Восточной Евразии. Ключевыми элементами этой интеграции выступают транспортные, энергетические, информационные и финансовые сети, а также социокультурные связи между регионами.

Сеть железнодорожных магистралей, таких как Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали (БАМ), играет ключевую роль в транспортном обеспечении межрегиональных связей. Развитие международных транспортных коридоров, включая «Приморье-1» и «Приморье-2», позволяет увеличить экспортно-импортный потенциал геотерий Дальнего Востока, соединяя российские территории с экономиками Китая, Монголии, Казахстана и других стран.

Энергетическая интеграция геоторий предполагает создание объединённых энергосистем, соединяющих регионы Дальнего Востока с энергетическими сетями Китая, Монголии и Казахстана. Система линий электропередачи высокого напряжения между Россией и странами Восточной Азии обеспечивает эффективное использование гидроэнергетического потенциала Сибири и Дальнего Востока.

Развитие речного транспорта на евразийском пространстве также способствует интеграции геоторий в единую логистическую систему. Формирование Транспортно-энергетической водной системы (ТЭВС) позволяет объединить основные реки Сибири и Дальнего Востока в единую транспортную сеть, облегчая перемещение товаров и энергии между регионами.

#### **Направления инфраструктурной интеграции геоторий в контексте организации Евразийского геопространства:**

1. **Энергетические коммуникации** – развитие единой энергосистемы, включающей межрегиональные линии электропередачи, газопроводы и нефтепроводы, связывающие российские геотории с международными рынками.
2. **Железнодорожный транспорт** – модернизация Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей, развитие новых экспортных коридоров для сырья и готовой продукции.
3. **Автомобильный и авиационный транспорт** – создание скоростных автомагистралей, логистических центров, развитие инновационного дирижабельного и экранопланного транспорта, повышающего доступность отдалённых территорий.
4. **Речной транспорт** – развитие внутренних водных путей и их объединение в единую сеть грузоперевозок.
5. **Информационные и финансовые связи** – внедрение цифровых технологий в экономику, развитие блокчейн-платформ для торговли и финансов, создание виртуальных рынков и платёжных систем.
6. **Культурологическая и духовная интеграция** – реализация программ межрегионального обмена, развитие образовательных инициатив, поддержка этнических и культурных связей между народами Евразии.

#### **Сетецентрическая система инфраструктуры Евразии**

Современная концепция развития геоторий предполагает формирование сетецентрической (ячеистой) инфраструктурной модели, объединяющей регионы посредством транспортных, энергетических и цифровых сетей. В этой системе геотории функционируют как узловые элементы распределения ресурсов, потоков товаров, информации и капитала.

Примером реализации данной модели служит интеграция Байкальской, Сахалинской и Приморской геоторий в единую экспортно-ориентированную экономическую систему, взаимодействующую с рынками стран Азии.

Особое значение в сетецентрической интеграции приобретает энергосистемная компонента — использование спутниковых технологий для управления энергетическими потоками, мониторинга природных ресурсов и климатического моделирования.



Рис. 6. Геотерии – узловые составляющие сетевидной интеграции

На Рис. 6 представлена схема, иллюстрирующая роль геотерий как структурных узлов в транспортных, энергетических, цифровых и «энергокосмических» сетях. Сетевидная инфраструктура Евразии формируется на основе геотерий как точек концентрации и распределения потоков сырья, товаров, энергии, капитала и информации. Такая архитектура пространственной организации открывает возможности для устойчивого роста, увеличения экспортного потенциала и повышения глобальной конкурентоспособности российских регионов.

## Заключение

Природно-ресурсный потенциал геотерий, включающий значительные запасы полезных ископаемых, гидроэнергетические ресурсы и благоприятные климатические условия, создаёт объективные предпосылки для их устойчивого социально-экономического развития. Однако эффективное освоение этих территорий требует комплексного подхода, включающего индустриализацию, инфраструктурную модернизацию и внедрение технологических инноваций.

Экспортно-ориентированные геотерии, такие как Кузбасс, Якутия и Сахалин, демонстрируют успешную модель интеграции в мировые рынки посредством стратегических соглашений о разделе продукции (СРП) и участия в международных транспортно-логистических коридорах. Вместе с тем, эти регионы сталкиваются с рядом вызовов, включая зависимость от внешнеэкономической конъюнктуры и необходимость структурной диверсификации экономики.

Научное и социогуманитарное обеспечение геотерийного развития, представленное такими центрами, как Новосибирский Академгородок, а также Иркутский, Якутский и Дальневосточный научные центры, формирует основу для перехода к экономике знаний. Подготовка кадров, развитие образовательных и

исследовательских институтов являются необходимыми условиями для комплексного освоения геоторий.

Критическим фактором выступает развитие транспортной, энергетической и цифровой инфраструктуры, обеспечивающей включённость геоторий в Единую систему развития Восточной Евразии. Технологии нового поколения — блокчейн, спутниковые системы, цифровые двойники, платформы виртуального обмена — создают предпосылки для перехода к сетевцентрической модели территориального управления.

В перспективе ключевым направлением развития геоторий становится внедрение принципов устойчивого природопользования и экологической безопасности. Переход к «зелёной» экономике, развитие возобновляемых источников энергии и цифровизация природоохранной деятельности позволяют минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечить высокое качество жизни населения.

Таким образом, геотории представляют собой не только ресурсную и энергетическую основу экономики России, но и стратегический инструмент пространственной интеграции страны в глобальную экономическую систему. Реализация комплексных программ модернизации и устойчивого развития геоторий обеспечит долгосрочное повышение конкурентоспособности российских регионов и их эффективную интеграцию в мировое хозяйственное пространство.

## Литература

1. Бушуев В.В., Зайченко В.М. Энергетика геотории // Региональная энергетика и энергосбережение. 2021. № 3. С. 50–53.
2. Бушуев В.В., Клепач А.Н., Соловьев Д.А., Сокотущенко Н.В. Геотории Сибири: экономические, экологические и социогуманитарные аспекты. Москва: ИД «Энергия», 2025.
3. Бушуев В.В., Клепач А.Н., Зайченко В.М., Сокотущенко Н.В., Соловьев Д.А. Устойчивое развитие геоторий Дальнего Востока: оценка потенциала, влияние на экономику и качество жизни. Москва: ИД «Энергия», 2024.
4. Бушуев В.В., Соловьев Д.А. Геотории как земные аналоги космических структур // В сб. «Энергетика России» (Избранные статьи, доклады, презентации и неопубликованные авторские материалы 2021 – 2024 гг.), Том 6. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. С. 406.
5. Огнев И.А. Современная политика комплексного освоения и развития приоритетных территорий Российской Федерации // Общество, наука, инновации (НПК-2015). 2015. С. 2091–2093.
6. Волжская ГЭС [Электронный ресурс]. . 2025 URL: [https://volges.rushydro.ru/?utm\\_source=google.com&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.com&utm\\_referrer=google.com](https://volges.rushydro.ru/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com) (дата обращения: 8.02.2025).
7. Косыкина М. История «черного неба»: как Красноярская ГЭС и незамерзающий Енисей изменили климат региона [Электронный ресурс]. . 2020 URL: [https://ecosphere.press/2020/11/20/istoriya-chernogo-neba-kak-industrializacziya-i-krasnoyarskaya-ges-izmenili-klimat-regiona/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ecosphere.press/2020/11/20/istoriya-chernogo-neba-kak-industrializacziya-i-krasnoyarskaya-ges-izmenili-klimat-regiona/?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения: 8.02.2025).



8. Пименова Н.А., Кулабухова А.А. Соглашения о разделе продукции (СРП): анализ российской практики // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2016. № 11. С. 19–24.
9. Бушуев В.В., Соловьев Д.А., Сокотушенко Н.В. Применение опыта соглашений о разделе продукции (СРП) для стимулирования экономического развития геотерий Дальнего Востока России // III Всероссийская конференция с международным участием, посвященная памяти академика А.Г. Гранберга «Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность». 2023. С. 210–214.
10. Караганов С. Сибиризация: Второй поворот России на Восток лежит “за Камнем” [Электронный ресурс]. . 2024 URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/comments/sibirizatsiya-vtoroy-povorot-rossii-na-vostok-lezhit-za-kamnem/> (дата обращения: 8.02.2025).
11. Новак А.В. Энергетическая политика России: разворот на Восток // Энергетическая политика. 2023. № 6. С. 14–19. DOI:EDN: GIGVUG.
12. Бушуев В.В. ПОВОРОТ на ВОСТОК! – Назад или Вперед? Институт энергетической стратегии, 2023.
13. Бушуев В.В., Соловьев Д.А., Сокотушенко Н.В. Применение опыта соглашений о разделе продукции (СРП) для стимулирования экономического развития геотерий Дальнего востока России // Сборник трудов “Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность III Всероссийская конференция с международным участием, посвященная памяти академика А.Г. Гранберга”, 11-13 октября 2023 года, г. Новосибирск. 2023. С. 210–214.
14. Академгородок [Электронный ресурс]. . 2025 URL: [https://novo-sibirsk.ru/about/akademgorodok/?utm\\_source=chatgpt.com](https://novo-sibirsk.ru/about/akademgorodok/?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения: 8.02.2025).
15. Суртаев Б.М. Этнографический туризм как способ сохранения и возрождения этнокультурного наследия // Вестник угроведения. 2012. № 1 (8). С. 178–182.
16. Кобзев И.И. СПРАВКА О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ НА 15.03. 2021 г. // Образование. № 6(5). С. 5–6.
17. Сиявцев Т.Д., Родина Л.А. Перспективы развития Сибирского федерального округа с позиции экономики знаний // *Экономика*. 2018. № 3(11). С. 72–84.

## References

1. Bushuev V.V., Zaichenko V.M. Energy of Geoteries // *Regional Energy and Energy Saving*. 2021. No. 3. P. 50–53.
2. Bushuev V.V., Klepach A.N., Solovyev D.A., Sokotushchenko N.V. Geoteries of Siberia: Economic, Environmental, and Socio-Humanitarian Aspects. Moscow: ID "Energia", 2025.
3. Bushuev V.V., Klepach A.N., Zaichenko V.M., Sokotushchenko N.V., Solovyev D.A. Sustainable Development of the Geoteries of the Russian Far East: Potential Assessment, Impact on the Economy and Quality of Life. Moscow: ID "Energia", 2024.
4. Bushuev V.V., Solovyev D.A. Geoteries as Terrestrial Analogues of Space Structures // In *Energy of Russia (Selected Articles, Reports, Presentations, and Unpublished Materials 2021–2024)*, Vol. 6. Moscow: LLC "Sam Poligrafist", 2024. P. 406.
5. Ognev I.A. Modern Policy of Comprehensive Development of Priority Territories of the Russian Federation // *Society, Science, Innovations (NPC-2015)*. 2015. P. 2091–2093.

6. Volzhskaya HPP [Electronic resource]. 2025. URL: [https://volges.rushydro.ru/?utm\\_source=google.com&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.com&utm\\_referrer=google.com](https://volges.rushydro.ru/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com) (accessed: 08.02.2025).
7. Kos'kina M. The History of "Black Sky": How the Krasnoyarsk HPP and the Unfreezing Yenisei Changed the Region's Climate [Electronic resource]. 2020. URL: [https://ecosphere.press/2020/11/20/istoriya-chernogo-neba-kak-industrializatsiya-i-krasnoyarskaya-ges-izmenili-klimat-regiona/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ecosphere.press/2020/11/20/istoriya-chernogo-neba-kak-industrializatsiya-i-krasnoyarskaya-ges-izmenili-klimat-regiona/?utm_source=chatgpt.com) (accessed: 08.02.2025).
8. Pimenova N.A., Kulabukhova A.A. Production Sharing Agreements (PSAs): Analysis of Russian Practice // Problems of Economics and Management in the Oil and Gas Complex. 2016. No. 11. P. 19–24.
9. Bushuev V.V., Solovyev D.A., Sokotushchenko N.V. Application of Production Sharing Agreement (PSA) Experience to Stimulate Economic Development of the Russian Far East Geotories // III All-Russian Conference with International Participation in Memory of Academician A.G. Granberg "Spatial Analysis of Socio-Economic Systems: History and Modernity". 2023. P. 210–214.
10. Karaganov S. Siberianization: Russia's Second Turn to the East Lies "Beyond the Stone" [Electronic resource]. 2024. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/comments/sibirizatsiya-vtoroy-povorot-rossii-na-vostok-lezhit-za-kamnem/> (accessed: 08.02.2025).
11. Novak A.V. Russia's Energy Policy: Pivot to the East // Energy Policy. 2023. No. 6. P. 14–19. DOI: EDN: GIGVUG.
12. Bushuev V.V. TURN to the EAST! – Backward or Forward? Institute of Energy Strategy, 2023.
13. Bushuev V.V., Solovyev D.A., Sokotushchenko N.V. Application of Production Sharing Agreement (PSA) Experience to Stimulate Economic Development of the Russian Far East Geotories // Collected Papers "Spatial Analysis of Socio-Economic Systems: History and Modernity" III All-Russian Conference with International Participation in Memory of Academician A.G. Granberg, October 11–13, 2023, Novosibirsk. 2023. P. 210–214.
14. Akademgorodok [Electronic resource]. 2025. URL: [https://novo-sibirsk.ru/about/akademgorodok/?utm\\_source=chatgpt.com](https://novo-sibirsk.ru/about/akademgorodok/?utm_source=chatgpt.com) (accessed: 08.02.2025).
15. Surtaev B.M. Ethnographic Tourism as a Means of Preserving and Reviving Ethnocultural Heritage // Bulletin of Ugrian Studies. 2012. No. 1 (8). P. 178–182.
16. Kobzev I.I. REPORT on the State and Prospects for the Use of the Mineral Resource Base of the Irkutsk Region as of 15.03.2021 // Education. No. 6(5). P. 5–6.
17. Sinyavets T.D., Rodina L.A. Prospects for the Development of the Siberian Federal District from the Perspective of the Knowledge Economy //  $\pi$ -Economy. 2018. No. 3(11). P. 72–84.

## Geotories: Geo-Resources, Geo-Energy, Geo-Infrastructure

<sup>1,1</sup> Vitaly Bushuev, <sup>1,2</sup> Andrey Klepach, <sup>1,3</sup> Dmitry Solovyev

<sup>1</sup>Institute of Energy Strategy, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: <sup>1</sup> vital@guies.ru, <sup>2</sup> hvv@inveb.ru,  
<sup>3</sup> solovev@ocean.ru

**Abstract.** The article explores the concept of "geotories"—special spatial units formed on the basis of natural, economic, and sociocultural potential. These units ensure both autonomous economic development of regions and their integration with neighboring territories into a common "organized space" of Eurasia. Geotories differ from traditional administrative-territorial units and spatial clusters by prioritizing natural factors driven by geographical and cosmoplanetary processes, as well as by emphasizing systemic integrity rather than functional specialization. The study analyzes the resource potential of geotories (including mineral, water, biological, and energy resources), which determines their specialization and competitive advantages. Particular attention is given to export-oriented geotories, such as those of Kuzbass, Sakhalin, and Yakutia. Geotories are conceptualized as nodes within a network-centric infrastructure model of the "Greater System," which structures the spatial organization of Eurasia through the realization of their natural, scientific, economic, sociocultural, and administrative potential.

**Keywords:** Geotories of Russia, resources, infrastructure, sustainable economic and socio-humanitarian development, network-centric spatial organization of Eurasia.

УДК 332.153

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-52-61

EDN: INLCXA

## Оценка использования газогенераторных электростанций на биотопливе в децентрализованных зонах электроснабжения

<sup>1,1</sup> Губий Елена Валерьевна <sup>[0000-0003-0737-1835]</sup>,<sup>1,2</sup> Козлов Александр Николаевич <sup>[0000-0002-5983-5884]</sup>,<sup>1,3</sup> Пензик Максим Владиславович <sup>[0000-0002-3544-9866]</sup><sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, 664033, РоссияE-mail: <sup>1</sup>egubiy@gmail.com, <sup>2</sup>kozlov@isem.irk.ru,  
<sup>3</sup>penzik@isem.irk.ru

**Аннотация.** Проведен анализ экономической эффективности газогенераторных электростанций, работающих на биомассе. Экономические оценки показали, что при выработке электрической энергии значения нормированной стоимости варьируется от 34–87 руб./кВт·ч. В режиме когенерации значения нормированной стоимости электроэнергии возрастают до 41–90 руб./кВт·ч из-за превалирования дополнительных инвестиций над экономией топлива. Показано, что щепу целесообразно возить на расстояние не более 115 и 180 км по сравнению с пеллетами и дизельным топливом соответственно.

**Ключевые слова:** биоэнергетика, газогенератор, газогенераторная электростанция, древесная щепа, топливные пеллеты

### 1 Введение

Биомасса является перспективным источником энергии, которую можно эффективно конвертировать в электрическую и тепловую энергию с помощью процесса газификации [1]. Основным направлением роста доли биомассы в электроэнергетике является использование газогенераторных электростанций (ГГЭС)

небольшой мощности для локального энергоснабжения. Как правило, такие электростанции состоят из газогенератора биомассы и двигателя внутреннего сгорания, соединенного с электрическим генератором [2]. Применение таких электростанций может быть особенно эффективно на территориях, отдаленных от основных транспортных магистралей, где транспортировка топлива затруднена из-за сезонности поставок или ее высокой стоимости, где потенциал солнечной и ветровой энергии не позволяет их использовать для устойчивого энергоснабжения, при этом рассматриваемые территории должны иметь достаточные ресурсы биомассы.

Древесная биомасса отличается от ископаемых топлив низким содержанием серы, азота и золы [3], обладает нулевой эмиссией CO<sub>2</sub>. Однако мощность ГГЭС ограничена логистическими проблемами доставки топлива [4].

Для повышения надежности энергоснабжения используются гибридные системы, включающие несколько возобновляемых источников энергии (ВИЭ), газогенератор на биомассе и дизельную электростанцию (ДЭС). Вместе они обеспечивают высокую надежность автономного энергоснабжения при минимальных затратах [5, 6]. Стоит отметить, что на территориях, на которых имеются ресурсы биомассы, ГГЭС в составе гибридной энергосистемы являются более предпочтительным вариантом, чем ДЭС [7].

Возможность применения источников энергии на основе технологии газификации биомассы нуждается в тщательной оценке для каждого конкретного случая. Экономическая эффективность такого способа электроснабжения зависит от ряда факторов: обеспеченность сырьем в долгосрочной перспективе, транспортная инфраструктура местности, возможность бесперебойной поставки биотоплива и др. В статье представлены результаты оценки эффективности ГГЭС для населенных пунктов, расположенных на побережье озера Байкал. Рассматриваемые населенные пункты имеют децентрализованное энергоснабжение, для которых доставка топлива затруднена и носит сезонный характер.

## **2 Материалы и методы**

### **2.1 Методы**

В мировой практике для выбора одного энергетического проекта среди нескольких в качестве основного инструмента применяется показатель нормированной стоимости электроэнергии LCOE (Levelized cost of energy) [8]. Этот показатель представляет собой отношение суммы всех затрат (капитальных и текущих) в течение жизненного цикла проекта к вырабатываемой за весь срок службы электроэнергии. Нормированная стоимость электроэнергии отражает такой тариф на электрическую энергию, при котором инвестору обеспечена безубыточность. Этот показатель определяется по формуле (1):

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n (C(t) + I(t)) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n E(t) \cdot (1+r)^{-t}}, \quad (1)$$

где  $C(t)$  – эксплуатационные затраты в год  $t$ , млн руб.;  $I(t)$  – капитальные затраты, млн руб.;  $r$  – ставка дисконтирования;  $E(t)$  – количество произведенной электроэнергии в год  $t$ , кВт·ч;  $n$  – жизненный цикл проекта, количество лет.

## 2.2 Исходные данные

Площадь Байкальской природной территории (БПТ) составляет 386 тыс. км. Центральная экологическая зона (ЦЭЗ) БПТ включает в себя озеро Байкал, острова и водоохранную зону, и имеет площадь около 90 тыс. кв. км [9]. Для предотвращения негативного воздействия на экологическую систему озера Байкал разработан перечень видов хозяйственной деятельности, запрещенных в ЦЭЗ БПТ [10]. На территории, входящей в ЦЭЗ, имеются населенные пункты, в которых отсутствует централизованное электроснабжение: Давша, Курбулик, Зама, Кочерикова, Онгурен (Рис. 1).



Рис. 1. Месторасположение объектов исследования.

Поселок Давша был упразднен в 2023 году. Однако остались объекты Баргузинского заповедника: центральная усадьба, метеостанция и несколько жилых домов. Электроснабжение в основном отсутствует, только метеостанция обеспечена фотоэлектрической станцией (ФЭС). Другим поселком, в котором полностью отсутствует электроснабжение является Курбулик. В населенных пунктах

Кочерикова и Зама электроснабжение осуществляется от ДЭС. В поселке Онгурен имеется гибридная микроэнергосистема в составе ДЭС, ФЭС и ветроэнергетической установки (ВЭУ). Однако при проектировании и монтаже данной системы были допущены существенные ошибки, поэтому ВЭУ не работает, а ФЭС работает на значительно меньшей мощности, чем запланировано. Таким образом, электроснабжение осуществляется почти полностью за счет ДЭС. Несмотря на дефицит электрогенерирующих мощностей в этих населенных пунктах, все они имеют высокую перспективу развития, которую определяет тенденция активного вовлечения территорий в экотуризм.

В Табл. 1 представлены характеристики рассматриваемых населенных пунктов с учетом развития туристической инфраструктуры и фермерских хозяйств.

**Таблица 1.** Текущий уровень и перспективные показатели электроснабжения в исследуемых населенных пунктах.

Населенный пункт	Текущие показатели		Перспективные показатели	
	Максимальная нагрузка, кВт	Энергопо-требление, тыс. кВт·ч/год	Максимальная нагрузка, кВт	Энергопо-требление, тыс. кВт·ч/год
Онгурен	110	392,4	400	638,74
Кочерикова	20	66,2	40	66,20
Курбулик	-	-	100	103,9
Зама	-	-	40	66,20
Давша	3,0	4,1	12	20,51

При оценке экономической эффективности ГГЭС приняты следующие исходные данные.

В состав капитальных затрат входят:

- ГГЭС в сборке (газогенератор Power Pallet PP30 с ДВС (двигателем внутреннего сгорания) 30 кВт) стоимостью 3,7 млн руб.;
- блок когенерации – 15% от стоимости газогенератора и ДВС;
- холодный склад для хранения биотоплива, площадь которого варьируется от сезонности поставок грузов в населенный пункт – 10 тыс. руб./м<sup>2</sup>;
- модульные здания для ГГЭС – 30 тыс. руб./м<sup>2</sup>;
- ДЭС (25 кВт) – 3,9 млн руб.;
- емкости для хранения дизельного топлива – 70 тыс. руб.;
- стоимость монтажных работ варьируется в зависимости от состава оборудования от 0,5 до 1 млн руб.

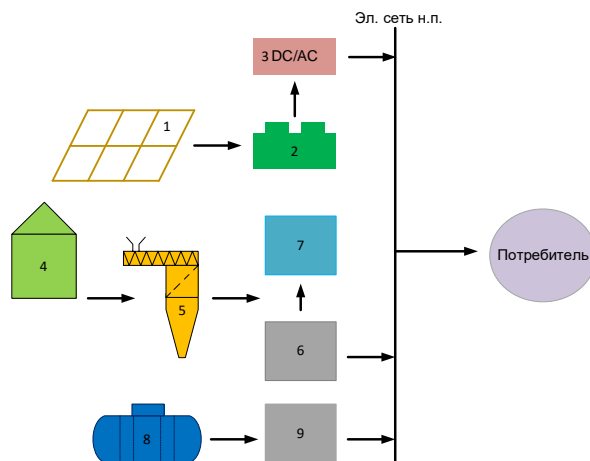
В состав текущих ежегодных затрат входят:

- биотопливо: пеллеты – 7 тыс. руб./т, топливная щепа – 1,5 тыс. руб./т;
- доставка биотоплива автомобильным транспортом – 16 руб./км·м<sup>3</sup>;
- дизельное топливо (включая доставку) – 55–58 тыс. руб./т (разница в стоимости дизельного топлива зависит преимущественно от транспортной инфраструктуры местности и, как следствие, от сложности доставки грузов в конкретный населенный пункт);

- фонд оплаты труда – 0,5 млн руб./чел. в год;
- техническое обслуживание – 3% от стоимости газогенератора и ДВС;
- налог на имущество – 2%;
- амортизация рассчитывается линейным методом.

### 3 Схема электроснабжения потребителей

На Рис. 2 представлена принципиальная схема ГТЭС, которая может быть до-оснащена системой когенерации. Для выработки тепла используется либо часть генераторного газа, либо тепло дымовых газов ДВС, температура которых составляет около 300–350 °С. Данная схема может быть дополнена ДЭС и станцией, работающей на ВИЭ. ДЭС может быть использована как для покрытия пиковых нагрузок, так и для резервирования на случай профилактических и аварийных выключений газогенератора. Электростанция на ВИЭ (солнце, ветер) используется для покрытия пиковых нагрузок, так и для снижения доли использования дизельного топлива.



**Рис. 2.** Схема микроэнергосистемы в составе ФЭС, ГТЭС и ДЭС. 1 – фотоэлектрический преобразователь, 2 – аккумуляторы, 3 – инвертор, 4 – топливный склад, 5 – газогенератор, 6 – газопоршневой двигатель с электрогенератором, 7 – блок когенерации, 8 – склад дизельного топлива, 9 – дизельный двигатель с электрогенератором.

В качестве исходных данных для расчетов в статье использованы ГТЭС Power Pallet PP30 производства компании All Power Labs (США). Газогенераторы компании APL использованы во многих работах по исследованию локальных систем энергоснабжения на основе технологии газификации биомассы [11, 12]. Ее основные характеристики представлены в Табл. 2.

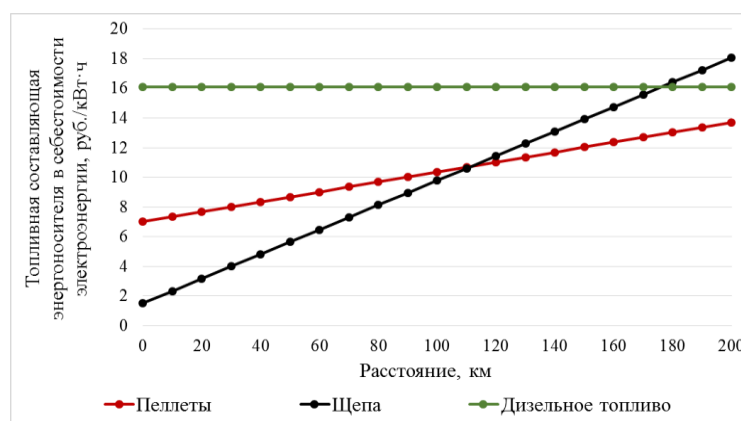


**Таблица 2.** Характеристики газогенераторной электростанции Power Pallet PP30.

	Генерация электроэнергии	Когенерация
Электрическая мощность	18 кВт	18 кВт
Тепловая мощность	–	27 кВт
Удельный расход топлива	1 кг/ кВт·ч	0,4 кг/ кВт·ч
Расход энергии на собственные нужды	1,6%	1,6%
КПД	92%	92%
Максимальное время непрерывной работы	>16 часов	>16 часов
Время запуска	10–15 минут	10–15 минут

#### 4 Экономическая оценка использования газогенераторов

При оценке топливной составляющей энергоносителя в себестоимости электроэнергии важной составляющей является стоимость транспортировки, особенно, когда речь идет об удаленных населенных пунктах с плохой или отсутствующей транспортной инфраструктурой. Поэтому для всех пяти рассматриваемых населенных пунктов были проанализированы топливные составляющие в конечной стоимости электроэнергии. На Рис. 3 показано, как изменяется топливная составляющая в стоимости электроэнергии при использовании пеллет, щепы и дизельного топлива в зависимости от дальности грузоперевозок.



**Рис. 3.** Зависимость изменения топливных составляющих разных видов топлива в себестоимости электроэнергии.

Установлено, что при транспортировке биотоплива на расстояние менее 115 км целесообразно использовать топливную щепу, более 115 км – пеллеты; на расстояние менее 180 км выгоднее транспортировать щепу, чем дизельное топливо, на большее расстояние – наоборот.

В ЦЭЗ транспортировка топливной щепы целесообразна только в п. Курбулик, расположенном в 50 км от п.г.т. Усть-Баргузин (центр лесозаготовки Республики Бурятия). Из-за большой удаленности от мест переработки древесины в остальные населенные пункты экономически целесообразнее поставлять древесные пеллеты, ввиду их более высоких насыпной плотности и теплоты сгорания.

В Табл. 3 представлены показатели, характеризующие перспективное электроснабжение рассматриваемых населенных пунктов. Проведенные экономические оценки показали, что значение себестоимости электрической энергии зависит от электрической нагрузки и дальности транспортировки топлива. Чем меньше электрическая нагрузка, тем большую долю затрат в себестоимости занимает фонд оплаты труда. С увеличением электрической нагрузки стоимость топлива и его транспортировки превалируют над фондом оплаты труда.

**Таблица 3.** Некоторые показатели, характеризующие перспективное электроснабжение рассматриваемых населенных пунктов.

Населенный пункт (топливо)	Состав оборудования	Удельная себестои- мость, руб./кВт·ч	LCOE, руб./кВт·ч		
			ГГЭС	ГГЭС (ко- генерация)	ДЭС
Онгурен (пеллеты)	8ГГЭС+ДЭС + СЭС	28,7	33,6	41,4	17,2
Кочерикова (пеллеты)	ГГЭС+ДЭС	36,2	47,8	55,7	27,3
Курбулик (пеллеты)	4ГГЭС	26,1	40,8	44,2	22,6
Курбулик (щепа)	4ГГЭС	23,2	38,2	40,6	22,6
Зама (пеллеты)	ГГЭС+ДЭС	37,8	55,8	62,1	30,1
Зама (пеллеты)	2ГГЭС	37,3	58,2	66,1	30,1
Давша (пеллеты)	ГГЭС	53,9	87,3	90,4	53,3

Наиболее низкое значение LCOE 33,6 руб./кВт·ч, несмотря на большое транспортное расстояние, оказалось в Онгурене. Это связано с эффектом масштаба производства (максимальная нагрузка составляет 400 кВт, ежегодное потребление электроэнергии – почти 640 тыс. кВт·ч). В результате эффекта масштаба значение LCOE в Давше оказалось самым высоким – 87,3 руб./кВт·ч. В поселках Кочерикова и Зама, где максимальная нагрузка и потребление электроэнергии одинаковы, значения LCOE существенно различаются. В Кочерикова оно составляет 47,8 руб./кВт·ч, что на 8 руб./кВт·ч ниже, чем при аналогичных схемах электроснабжения в Зама. Это вызвано разницей капитальных затрат (в н.п. Кочерикова уже есть ДЭС достаточной мощности, а в н.п. Зама требуется ее приобретение). Согласно другой схеме электроснабжения н.п. Зама, при которой предусматривается отказ от ДЭС, но при этом используются 2 ГГЭС, LCOE составляет 58,2 руб./кВт·ч. В н.п. Курбулик, где до настоящего времени электроснабжение не

осуществлялось, в случае работы ГГЭС на пеллетах, LCOE составляет 40,8 руб./кВт·ч, на топливной щепе – 38,2 руб./кВт·ч.

Проведенные оценки показали, что в результате перехода ГГЭС в режим когенерации, LCOE возрастают вследствие превалирования дополнительных инвестиций над экономией топлива. При среднем возрастании капитальных затрат на 11% значение LCOE возрастает на 3–23%.

В последнем столбце Табл. 3 указаны значения LCOE для случаев электроснабжения с использованием только ДЭС. Естественно, что по сравнению с электростанциями, работающими на ВИЭ эти значения ниже (на 40–60%).

## 5 Заключение

Рассмотрены варианты организации электроснабжения децентрализованных потребителей с использованием ГГЭС, работающих на древесном топливе. При оценке транспортной составляющей древесного топлива показано, что щепу выгодно поставлять на расстояние не более 115 км и 180 км от потребителя по сравнению с пеллетами и дизельным топливом соответственно.

Экономические оценки показывают, что значения LCOE варьируются от 33,6 до 87,3 руб./кВт·ч при выработке электрической энергии и от 41,4 до 90,4 руб./кВт·ч в режиме когенерации. Данные величины зависят, прежде всего, от уровня электрической нагрузки. Чем ниже электрическая нагрузка, тем менее эффективна когенерация.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004 и № FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур».

## Литература

1. Ruiz J.A. et al. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. P. 174–183.
2. Situmorang Y.A. et al. Small-scale biomass gasification systems for power generation (< 200 kW class): A review // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2020. Vol. 117. P. 109486.
3. Lisý M. et al. Characteristic properties of alternative biomass fuels // *Energies*. 2020. Vol. 13(6). P. 1448.
4. Asadullah M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 201–215.
5. Tomin N. et al. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 183. P. 903–921.

6. Chambon C.L. et al. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: The case of rural India // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 154. P. 432–444.
7. Shakirov V., Kozlov A. Multi-criteria assessment of biomass gasification-based hybrid energy systems in remote areas // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2022. Vol. 17(2).
8. Hansen K. Decision-making based on energy costs: Comparing levelized cost of energy and energy system costs // *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. P. 68–82.
9. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2016 году». Иркутск: ИНЦХТ, 2017. 374 с.
10. Decree of the Government of the Russian Federation No. 643 “On approval of the list of activities prohibited in the central ecological zone of the Baikal natural territory” dated August 30, 2001 (as amended on March 26, 2018). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102072593> (date of access: 09/29/2024). Puglia M. et al. Efficiency and economical assessment of a solar powered dryer combined with a biomass gasification system // *International Journal of Heat and Technology*. 2019. Vol. 37(3). P. 705–709.
11. Pedrazzi S. et al. Techno-economic study of a small scale gasifier applied to an indoor hemp farm: From energy savings to biochar effects on productivity // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 228. P. 113645.

## Reference

1. Ruiz J.A. et al. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. Pp. 174–183.
2. Situmorang Y. A. et al. Small-scale biomass gasification systems for power generation (< 200 kW class): A review // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2020. Vol. 117. Pp. 109486.
3. Lisý M. et al. Characteristic properties of alternative biomass fuels // *Energies*. 2020. Vol. 13(6). Pp. 1448.
4. Asadullah M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. Pp. 201–215.
5. Tomin N. et al. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 183. Pp. 903–921.
6. Chambon C.L. et al. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: The case of rural India // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 154. Pp. 432–444.
7. Shakirov V., Kozlov A. Multi-criteria assessment of biomass gasification-based hybrid energy systems in remote areas // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2022. Vol. 17(2).
8. Hansen K. Decision-making based on energy costs: Comparing levelized cost of energy and energy system costs // *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. Pp. 68–82.
9. State report “On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2016.” Irkutsk: INCHT, 2017. 374 p. (in Russian).
10. Decree of the Government of the Russian Federation No. 643 “On approval of the list of activities prohibited in the central ecological zone of the Baikal natural territory” dated August 30, 2001 (as amended on March 26, 2018). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102072593> (access date: 09/29/2024) (in Russian).

11. Puglia M. et al. Efficiency and economical assessment of a solar powered dryer combined with a biomass gasification system // *International Journal of Heat and Technology*. 2019. Vol. 37(3). Pp. 705–709.
12. Pedrazzi S. et al. Techno-economic study of a small scale gasifier applied to an indoor hemp farm: From energy savings to biochar effects on productivity // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 228. C. 113645.

## **Assessing the Use of Biomass-Fired Gas Power Plants in Decentralized Power Supply Areas**

<sup>1,1</sup> Elena Gubiy, <sup>1,2</sup> Alexander Kozlov, <sup>1,3</sup> Maxim Penzik

<sup>1</sup>Melentiev Energy Systems Research Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: <sup>1</sup>egubiy@gmail.com, <sup>2</sup>kozlov@isem.irk.ru,  
<sup>3</sup>penzik@isem.irk.ru

**Abstract.** The economic efficiency of biomass-fired gas-generator power plants is analyzed. Calculations have shown that when generating electricity, the levelized cost of energy varies within the range of 36–94 rubles/kW h. In the cogeneration mode, the levelized cost of energy increases to 37–99 rubles/kW h due to the predominance of additional investments over fuel savings. It is shown that it is advisable to transport wood chips over a distance of no more than 115 and 180 km compared to pellets and diesel fuel, respectively.

**Keywords:** bioenergy, fuel pellets, gas generator, gas generator power plant, wood chips

**Acknowledgement.** The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0004 and FWEU-2021-0004) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center.

## Рыбные ресурсы западных акваторий российской Арктики в условиях климатических изменений: потенциал и перспективы освоения

Исмаилова Эльмира Алиевна <sup>[0009-0003-1714-4529]</sup>

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

E-mail: ismailova.e.a@campus.mse-msu.ru

**Аннотация.** В настоящей обзорной статье рассмотрено влияние климатических изменений на потенциал рыбных ресурсов. В методологической части работы показано, что изменение температурного режима воды в мировом океане и отдельных показателей химического состава вынуждает популяции рыбных ресурсов изменять привычные места обитания. Из акваторий, затрагиваемых ростом температуры рыба мигрирует в северные широты. В свою очередь сокращение площади полярных льдов способствует зарождению устойчивых популяций рыбы в морях Северного Ледовитого океана. Рассмотрены возможности по увеличению вылова рыбы в Северо-восточной части Баренцева моря и Карском море. Показано, что с учетом современных климатических тенденций в среднесрочной перспективе возможно увеличение вылова рыбы в российской части Баренцева моря и начала промышленной добычи в Карском море. Составлен возможный прогноз миграции отдельных видов рыбы в Баренцевом море.

**Ключевые слова:** климатические изменения, рыбные ресурсы Арктики, вылов рыбы, популяция рыбы. Баренцево море, Карское море.

### 1 Введение

Глобальные климатические изменения наиболее интенсивно проявляются в Арктическом макрорегионе. По экспертным оценкам, темпы роста температуры приземного воздуха на севере в 2-2,5 раза быстрее чем в среднем на планете [1].

В VI оценочном докладе МГЭИК, в разделе, посвященном последствиям климатических изменений в полярных и приполярных областях, отмечаются существенные риски: (1) для наземной инфраструктуры и населенных пунктов (про-

таивание и деградация многолетней мерзлоты; эрозия береговой линии из-за поднятия уровня океана), (2) здоровью и благополучию населения (миграция заболеваний «южного типа»); интенсификация волн холода и жары), (3) отдельным био- и экосистемам (сокращения ареала обитания различных видов полярных животных и птиц) [2]. Россия занимает по площади наиболее значительную часть полярной и приполярной области и является страной, которая в наибольшей степени подвержена климатическим рискам возникающим в Арктике, что требует разработки необходимых мер адаптации. Вместе с тем, необходимо понимать, что адаптация это не только процесс и мероприятия по определению, оценке и прогнозу климатических рисков и смягчению их последствий для жизнедеятельности, но и поиск потенциальных перспективных возможностей для хозяйственной деятельности в целях улучшения жизни людей. Неслучайно в Оценочном докладе обозначаются определенные благоприятные перспективы для хозяйственной деятельности, использование которых является неотъемлемой частью процесса адаптации экономики и населения макрорегиона к климатическим изменениям [3]. По экспертным оценкам несмотря на значительные риски для российской части Арктики, климатические изменения формируют определенный потенциал возможностей в различных видах хозяйственной деятельности, задействование которого благоприятно скажется на экономике и жизни людей в макрорегионе [4-5].

К основным положительным последствиям климатических изменений в Арктике эксперты относят перспективы использования Северного морского пути (СМП) в качестве альтернативного транспортного маршрута [6-7], реализацию проектов нефте-газодобычи на шельфе Арктических морей (Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское, Якутское, Лаптевых и Берингово моря) и срединной части Северного ледовитого океана, снижение общего потребления энергетических ресурсов в регионе, а также развитие туристической отрасли [8]. Потенциальные преимущества обусловлены в первую очередь сокращением площади арктических льдов в акватории СЛО, динамика и скорость которого существенно увеличивается. В исследовании Программы Арктического мониторинга и оценки отмечается, что общая площадь ледяного покрова в СЛО за период 1980-2021 гг. сократилась с 7,8 млн км<sup>2</sup> до 3,8 млн км<sup>2</sup> [9]. А оценка ледовой обстановки в Карском море за последнее десятилетие свидетельствует, что в летний период оно стало практически полностью свободным от ледового покрова [10].

Одним из важных и перспективных направлений оценки влияния климатических эффектов на севере, являются рыбные ресурсы Северного ледовитого океана. Прибрежные моря СЛО состоят из Баренцева моря, Карского моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря, Чукотского моря в исключительных экономических водах России, а также море Бофорта, море Баффина, Гренландского моря, относящихся к зарубежным странам. Исторически промысел ведется в основном в Западной части Северного ледовитого океана – Баренцевом море и Гренландском море. Поэтому, как с теоретической, так и с практической точек зрения рассматривать вопрос потенциала рыбных ресурсов с учетом влияния климатических изменений имеет смысл именно в этом географическом секторе и сопредельных морских акваториях. Это подтверждается как теоретическими

изысканиями и анализом существующей ситуации в научных работах, так и рыбодобывающей практикой, и регулированием.

## **2 Обзор влияния температуры воды на состояние и вылов рыбных ресурсов**

Увеличение температуры океанических вод в северо-западной части Арктики (Баренцево и Карское моря) способствуют миграции более южных видов рыб на север и северо-восток, увеличению общей массы популяции и ускорению роста массы среднего экземпляра [11-12]. В свою очередь арктические виды рыбных ресурсов, характерные для данного макрорегиона, перемещаются еще севернее, в акватории, ранее скованные льдами и практически безжизненным в рыбной части.

Влияние изменения температурного режима на продуктивность рыбных ресурсов мирового океана достаточно подробно отражено в работе [13]. В данном исследовании, посвященном оценке среднегодового ежегодного улова основных видов промысловых рыб (перуанский анчоус, минтай, сардина тихоокеанская, атлантическая сельдь, атлантическая треска, мойва, рыба сабля, сардина европейская за период 1982-2006 гг., достаточно убедительно показывается, что в зависимости от температуры воды в период вылова объемы улова меняются значительно. Для видов, которые водятся в южных регионах среднегодовая температура воды, в которых относительно выше последующее увеличение температуры снижает продуктивность, в свою очередь для видов рыб, характерных для северных широт – плюсовые температурные аномалии увеличивают продуктивность (табл. 1).

Как видно из представленных в таблице сведений, есть определенная корреляция между температурой воды и продуктивностью видов рыбы. В частности, в южных районах увеличение температуры воды снижает продуктивность отдельных видов промысловой рыбы, характерных для данной акватории. В европейской части в Северном, Норвежском, южной части Баренцева моря, возле Исландии и Фарерских островов уменьшается вылов трески, которая является одной из основных продуктивных рыб данного региона. В свою очередь, в этом же районе растет вылов сельди и мойвы, для которых повышение температуры является благоприятным фактором роста. Негативная динамика наблюдается в центральных районах промысла в Тихом океане, где увеличение температуры воды неблагоприятно сказывается на популяции и соответственно улове.



**Таблица 1.** Средний сезонный вылов отдельных видов промысловых рыб за период 1982-2006 гг. в зависимости от температурного режима (тонн)

Отдельные основные районы мирового океана	Минтай		Сардина тихоокеанская		Сельдь атлантическая				Треска		Мойва	
	X	T	X	T	T	X	T	X	T	X	T	
Восточное Берингово море	928428	1003091										
Аляскинский залив США (Северо-Восток)	458087	519580				68354	67036	23523	26938			
Тихий океан восток Баренцево море (юг)			400419	247988		86484	139253	298896	280200	358009	445534	
Норвежское море						209001	588172	176489	146716	70653	80041	
Северное море Южная Атлантика			111399	155538		419023	453400	180122	87398			
Юг Индийского океана			9377	36608								
Тихий океан север	41502	25071	194633	627714								
Японское море	431584	241827	640373	244132								
Охотское море	1613863	1788034	176487	183130								
Запад Берингово море	626959	707839										
Исландия Фарерские острова						84955	105618	259625	231416	634508	696323	
Итого	4100423	4285442	1532688	1495110	872608	1359386	958024	788926	1063170	1221898		

Увеличение температуры воды в акваториях: X – 0-0,6°C; T – 0,67-1,35°C

Источник: составлено автором по материалам Gamito, R., Costa, M.J. & Cabral, H.N. Fisheries in a warming ocean: trends in fish catches in the large marine ecosystems of the world. Reg Environ Change 15, 57–65 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0615-y>

Так, сопоставление вылова рыбы одного вида в Тихом океане и прилегающих к нему морях в разных температурных режимах показывает, что в центральной части улов снижается при увеличении температуры воды, а в северных районах наоборот увеличивается.

Косвенно сведения о разнонаправленном влиянии климатических изменений (в северных широтах рыбные ресурсы увеличиваются, а в центральных акваториях ближе к экватору сокращаются) на продуктивный потенциал рыбных ресурсов также подтверждаются статистическими данными по вылову рыбных ресурсов Российской Федерацией за последнее десятилетие (табл. 2).

**Таблица 1.** Российская динамика вылова рыбы в мировом океане 2014-2024 гг. (тыс. тонн)

Вылов рыбы	2014	2016	2018	2019	2021	2022	2023	2024 (9 м)
Общий вылов в океане	4021	4475	4834	4785	4839	4702	5158	3714
Россия	3005	3442	3781	3774	3933	3864	4438	3178
Прибрежные воды иностранных государств	807	782	787	652	655	620	437	363
Международные воды	207	250	265	357	250	217	283	171
% в России	0,75	0,77	0,78	0,79	0,81	0,82	0,86	0,86
% в прибрежных водах иностранных государств	0,20	0,17	0,16	0,14	0,14	0,13	0,08	0,10
% в международных водах	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05

Источник: составлено автором по данным Росрыболовства

Тенденция свидетельствует, что доля вылова в российской территориальных водах (преимущественно районы Баренцева, Берингова и Охотского морей) существенно выросла за последние 10 лет и составила 86%. Практически неизменной осталась доля вылова в международных водах, что, в первую очередь, связано с широкой географией вылова (Южная Атлантика, Индийский и Тихий океаны), где есть возможности по оценке фактического состояния доступных ресурсов и соответствующего маневра в случае снижения популяционной численности. При этом, доля акваторий иностранных государств значительно сократилась. Основные географические точки по вылову рыбы в прибрежных иностранных юрисдикциях составляли норвежский сектор Баренцева моря, Исландия и Фарерские острова, Норвежское море. Если сопоставить данные в таблицах 1 и 2, можно увидеть сокращение популяции основных промысловых рыб именно в этих морских акваториях.

Конечно, имеются и иные обстоятельства, влияющие на продуктивность, к которым относятся географические (океанические течения, погода, гидрометеорологические явления и т.п.), эколого-экономические (экологические проблемы,

квоты, экономические субъекты, спрос на рыбу и т.п.) факторы, но, очевидно, что климатические влияния играют определенно важную роль. В подтверждение данного тезиса следует отметить, что в ряде публикаций [14-16] достаточно подробно рассматриваются перспективы и потенциал промышленного вылова рыбы в акваториях севернее и восточнее острова Шпицберген. В частности, исследования показывают наличие достаточно крупных популяций тресковых видов в этом районе. А остров Шпицберген расположен в северо-западной части Баренцева моря между 76 и 80 градусами северной широты в 650 км от Северного полюса.

Анализ научных публикаций подтверждает, что изменение температурных режимов воды, химического баланса, а также сокращение площади арктических льдов благоприятно влияют на популяцию рыбных ресурсов [17-19]. В первую очередь, эти предпосылки реализуются на западе Северного Ледовитого океана, а именно в Баренцевом и Карском морях. Менее значимо рыболовство в восточных морях, что в первую очередь обусловлено пока еще тяжелыми ледовыми условиями и недостатком исследований рыбной популяции в этом районе. Хотя отдельные статистические данные в основном советского периода показывают, что улов рыбы в Карском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых, в период 1950-1980 гг. составлял в среднем 3000-15000 тонн за сезон [20]. Но, скорее уместно говорить, что это было сезонное рыболовство местного характера (дельты основных рек, заливы), а не промышленная добыча в морях. Учитывая, что наиболее значимые проявления климатических изменений в виде устойчивого сокращения площади арктического льда в течении длительного сезонного периода, а также фактически проведенные в современных реалиях исследования существующих популяций рыбы с учетом климатических трендов, целесообразно рассматривать перспективы освоения новых площадей рыбной добычи в российском секторе Баренцева и Карского морей.

### **3 Баренцево море (российский сектор): потенциал и перспективы рыбной отрасли в условиях климатических изменений**

Баренцево море является вторым главным регионом по промышленному вылову рыбных ресурсов, наряду с тихоокеанским сектором. Основную популяцию рыбных ресурсов, которая оценивается для коммерческого вылова Баренцева моря составляют треска, палтус, морской окунь, камбала, зубатка, пикша, мойва, креветки, беспозвоночные. Небольшими проявлениями к периодически появляются сельдь, корюшка, сайда, навага, сайка, налим морской, однако популяции этих рыб незначительны и в общем улове по годам составляют несколько тонн [21]. Кроме этого, в последние десятилетия выросла популяция дальневосточного краба, который был завезен сюда в целях распространения и создания условий для последующей коммерческой добычи.

Согласно оценкам Минприроды России промысловый запас Баренцева моря по ключевым видам рыбы составляет 5,3 млн тонн [22]. Основу промышленного рыболовства в первую очередь составляют рыбы тресковых пород (подробнее по улову см. табл. 3).

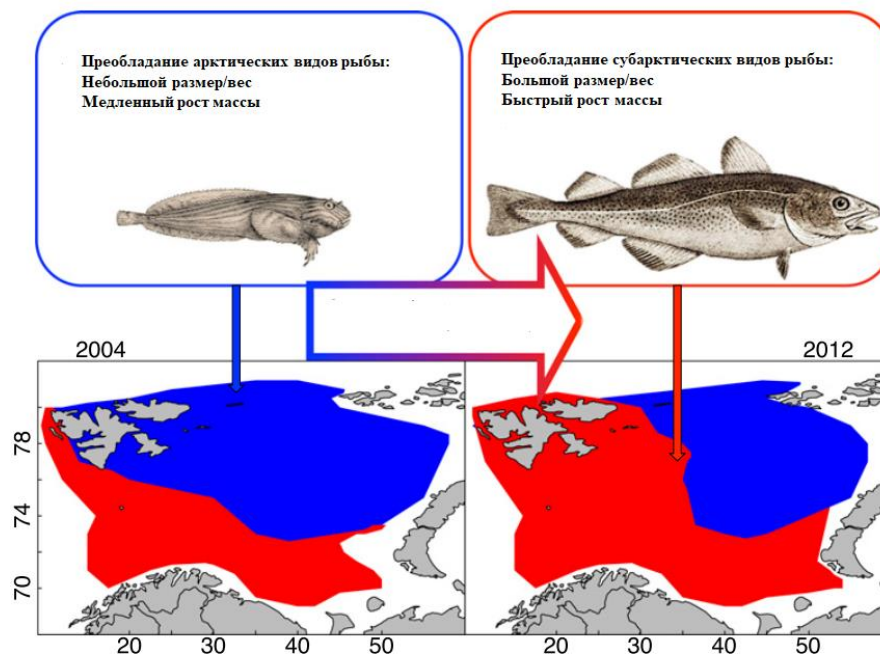
В водах Баренцева моря обитают атлантическая, гренландская и арктическая треска. Наиболее крупной и плодовитой является атлантический подвид, которые достигает 2 м в длину при весе до 95 кг. Комфортным температурным режимом для этого подвида является температура воды +2-10°C. Эта рыба в основном обитает в Северной Атлантике в норвежском секторе Баренцева моря. Вследствие климатических изменений, сокращения льдов на севере Баренцева моря проявляются характерные тенденции к миграции этого подвида в российскую часть, что в свою очередь отражается на общем объеме вылова рыбы. В исследовании [23] отмечается, что за последние 20 лет с 2004 года граница ареала обитания атлантической трески сместилась на северо-восток в стороны Новой Земли и Земли Франца-Иосифа. В свою очередь норвежские власти и ученые уже сейчас проводят оценку потенциальных перспектив вылова рыбы в новых акваториях к востоку от Шпицбергена.

Еще в 1970-е годы 20 века основным видом рыбы для промышленной добычи в Баренцевом море являлась арктическая треска, но постепенно этот вид замещается атлантической треской, о чем свидетельствуют исследования последних десятилетий [24]. С рыболовной точки зрения это положительная тенденция. Арктическая треска имеет меньший вес, размер и плодовитость, что сказывается на коммерческих показателях улова. При этом предполагается, что распространенные в этой части моря гренландский и арктический виды трески, которые значительно меньше по размерам и с точки зрения коммерческого вылова менее привлекательны смещаются далее на север.

Второй по значимости промысловой рыбой является пикша из семейства тресковых, улов которой (см. табл. 3, рис. 1) варьируется в пределах 35-60 тыс. тонн в год. Климатические условия для этой рыбы аналогичны атлантической треске. Хотя тренда на увеличение добычи не наблюдается, что, скорее всего, обусловлено факторами вне климатического характера.

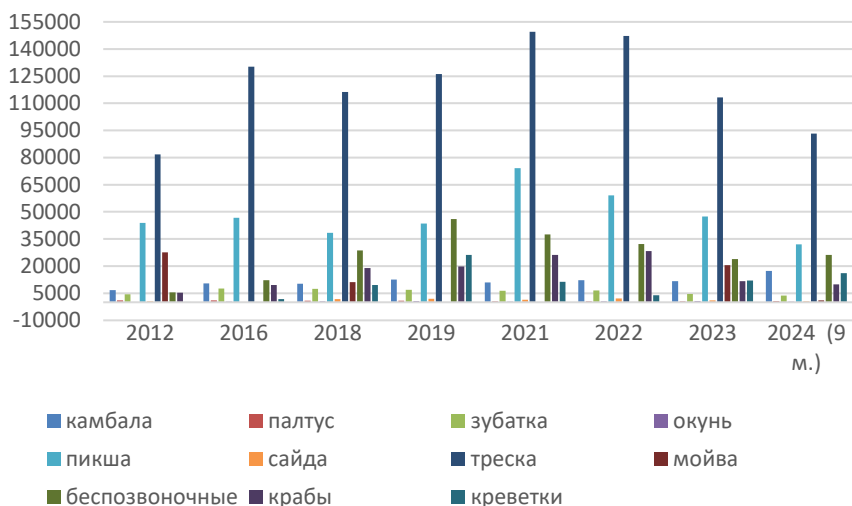
За последнее десятилетие наблюдается существенный рост улова морского окуня и палтуса. Морской окунь достаточно распространен в водах северной Атлантики, норвежском море, около побережья Гренландии. Рыба глубоководная и любит более холодные воды (примерная температура 2-3°C), что обуславливает логику увеличения добычи в российском секторе Берингова моря. Очевидно, что потепление в Северной Атлантике вынуждает популяцию постепенно мигрировать в северо-восточном направлении.

Исследования последних лет показывают, что в Северной части Атлантики происходит постепенный рост температуры воды [25], что вынуждает виды характерные для Норвежского моря, Юго-Западной части Баренцева моря и побережья вокруг Исландии мигрировать в сторону российской части Баренцева моря, Шпицбергена и далее на Северо-восток к побережью Новой Земли и Земли Франца-Иосифа (рис 1).



Источник: адаптировано автором по данным Leif Christian Stige and Kristina Øie Kvile Authors Climate warming drives large-scale changes in ecosystem function // PNAS, 2017, 114 (46) 12100-12102, <https://doi.org/10.1073/pnas.1717090114>

**Рис. 1** Изменение ареала обитания рыбы в Баренцевом море



**Рис. 2** Вылов основных видов рыбы в российском секторе Баренцева моря за период 2012-2024 гг. (тонн)

**Таблица 2.** Вылов основных видов рыбы в российском сектора Баренцева моря за период 2012-2024 гг. (тонн)

Виды рыбы	2012	2016	2018	2019	2021	2022	2023	2024 (9 м.)
камбала	6707	10391	10311	12523	10884	12215	11646	17351
палтус	952	1000	909	919	582	427	479	617
зубатка	4389	7552	7421	6960	6355	6484	4568	3705
окунь	27	316	580	620	345	533	680	293
пикша	43930	46637	38352	43444	74054	59131	47483	32070
сайда	487	2	1759	1928	1429	2147	1019	447
треска	81731	130265	116156	126081	149578	147251	113272	93194
мойва	27512	2	11077	32	5	4	20559	1038
беспозвоночные	5529	12237	28638	45992	37482	32218	23825	26109
крабы	5215	9473	18933	19723	26160	28376	11727	9961
креветки	5	1698	9598	26100	11291	3802	12097	16148
Итого	176484	219573	243734	284322	318165	292588	247355	200933

Источник: составлено автором по данным Росрыболовства <https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/statistika-i-analitika/>

Прогноз смещения популяции рыбных ресурсов на северо-восток Баренцева моря и далее в сторону центральной части СЛО и Карского моря во многом зависит от (1) среднесрочных климатических (температура воды, закисливание, уровень pH, редистрибуция холодной/теплой воды вследствие течений, площадь полярных льдов и т.п.) и (2) биологических тенденций (миграция фито и зоопланктона – основных источников пищи для рыбы, ареалов естественного обитания и нереста) в данной морской акватории. При этом, оба эти фактора тесно взаимосвязаны друг с другом. Уровень и масштаб миграции рыбы на север, связанная с ростом температуры воды и сокращением полярных льдов, во многом зависит не только от самого факта климатических аномалий, но и естественной средой обитания рыбы в предыдущие периоды – места нереста, доступные источники пищи.

(1) Большинство научных исследований, как чисто климатического характера (прогноз изменения климата и его последствий для океана – IPCC, AMAP и т.п.), так и оценивающих влияние на рыбную популяцию указывают на устойчивость климатического тренда на повышения температуры воды и сокращение площади океанического льда. Отмечаются разнонаправленные процессы в части закисливания, уровня pH воды и редистрибуции, однако эти процессы не линейны и в целом пока еще не критичны для акваторий СЛО. С климатической точки зрения есть очевидные предпосылки к увеличению ареала обитания рыбы в сторону севера.

(2) Более сложной представляется биология процесса. В текущей климатической ситуации миграция рыбных ресурсов ограничена местами нереста, наличием кормовой базы. Можно предполагать, что рыба мигрирует на Север и сформирует новый ареал обитания (нерестовую базу). Однако это условие выполнимо при устойчивом тренде на сокращение (отсутствие) океанического льда в новом ареале обитания в течении длительных периодов времени (5-7 лет), а также росту кормовой базы.

Кроме этого, различные виды рыбы имеют различные «предпочтения» в части ареала обитания. Для трески и пикши, которые предпочитают находиться возле океанического шельфа на небольших глубинах, соответственно предполагаемый ареал их миграции во много ограничен естественными географическими/геологическими условиями. Предпочтительным направлением и ограничением их возможного движения будет восток от Шпицбергена, и «западная линия» Земля Франца-Иосифа, Новая Земля. Глубоководные виды (морской окунь) могут иметь тенденции к миграции на север при условии наличия кормовой базы

Согласно прогнозным оценкам, представленным в ряде научных исследований, а также собственных оценок предполагаются следующие среднесрочные тенденции для отдельных видов промысловой рыбы (табл. 4).

**Таблица 3.** Предполагаемые тенденции в миграции рыбной популяции вследствие климатических изменений в Арктике

Виды рыбы	Место обитания в воде	°С	Миграция северо-восток Баренцева моря		Миграция СЛО	
			Вероятность	Ареал	вероятность	Ареал
Атлантическая треска	Придонное	>0	Высокая	Край шельфа	Средний	Край шельфа
Пикша	придонное	>2	Высокая	Край шельфа	Средний	Край шельфа
Морской окунь	глубоководное	>2	Высокая	Неограниченно	Высокая	Неограниченно
Палтус	глубоководное	>0	Средняя	За край шельфа	Средняя	За край шельфа
Мойва	Пелагический	>0	Средняя	Неограниченно	Средняя	Неограниченно
Креветки	придонное	>0	Высокая	Край шельфа	Высокая	Край шельфа
Арктическая треска	пелагический	>-1	Высокая	неограниченно	Высокая	неограниченно

Источник: разработано автором по оценкам из следующих научных работ: Hollowed, A.V., Barange, M., Beamish, R.J., Brander, K., Cochrane, K., Drinkwater,

K., Foreman, M.G.G., Hare, J.A., Holt, J., Ito, S-i, Kim, S., King, J.R., Loeng, H., MacKenzie, B.R., Mueter, F.J., Okey, T.A., Peck, M.A., Radchenko, V.I., Rice, J.C., Schirripa, M.J., Yatsu, A., Yamanaka, Y., 2013a. Projected impacts of climate change on marine fish and fisheries. *ICES J. Mar. Sci.* 70, 1023–1037, <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fst081>; Hollowed, A., Planque, B., Loeng, H., 2013b. Potential movement of fish and shellfish stocks from the sub-Arctic to the Arctic. *Fish. Oceanogr.* 22, 355–370, <http://dx.doi.org/10.1111/fog.12027>

#### **4 Карское море (российский сектор): потенциал и перспективы рыбной отрасли в условиях климатических изменений**

Карское море является по сути внутренним морем России. Последнее десятилетие в акватории наблюдается существенное сокращение площади океанического льда. По мониторинговым данным Арктического и антарктического научно-исследовательского института к 2020 г. с июля по декабрь наблюдалась устойчивая тенденция к отсутствию площади льда как на западе Карского моря, так и на востоке. Хотя исследования советского периода утверждают, что центральная часть Карского моря полностью безжизненна, с рыбной точки зрения [26], но в последние годы проявляются характерные тенденции появления устойчивой рыбной популяции, которая в среднесрочной перспективе может стать привлекательной для коммерческого вылова.

Потенциал промышленного рыболовства в акватории Карского моря еще недостаточно изучен. В исследовании ученых Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, который является головной организацией по изучению рыбной популяции, в том числе для целей промышленного улова отмечается, что в 20 в. в Карском море не наблюдалось значимой в хозяйственном отношении популяции рыбных ресурсов, за исключением прибрежных вод. Однако, начиная с 2010 г. в уловах присутствует виды рыб характерные для более южных акваторий Баренцева и Норвежского морей и Северной Атлантики, что авторы связывают с климатическими изменениями. В частности, популяция сайки уже оценивается в 200 тыс. тонн, что можно оценивать как значимую в хозяйственном отношении популяцию [27]. По данным Росрыболовства в среднесрочной перспективе Карское море может стать одним из центров промышленного промысла рыбы в России [28]. Акватория моря все большее время свободна от ледяного покрова, внутренняя экосистема моря достаточно устойчива и стабильна, что позволяет рассматривать его как перспективный центр рыбодобычи. Потенциал промышленного рыболовства в акватории еще не до конца изучен. Отмечается рост популяции дальневосточного краба, который мигрировал из прилегающего Баренцева моря [29]. Коммерческий вылов уже идет и квота 2022 г. составила 985 тонн [30].

Исторически промышленное рыболовство в этом районе идет достаточно давно, но сконцентрировано в основном в дельтах сибирских рек (Обь, Енисей),



а также в прилегающих заливах Карского моря [31]. Еще советский основоположник исследований Севера Славин С.В. отмечал, что вылов в сибирских реках в 50-60 г. 20 века уже составлял 30 тыс. тонн в год [32]. Пока, что данных о сколько-либо значимой добыче в центральной части Карского моря не имеется, но в последние 10 лет ведется учет вылова рыбы в заливах. По данным Росрыболовства в заливах Карского моря среднегодовой улов составляет около 300 тонн.

В Карском море основной вылов рыбы ведется в районах Гыданской губы на северо-востоке ЯНАО и Тазовской губы (ответвление от Обской губы). Динамика объемов вылова рыбных ресурсов в Карском море начала учитываться Росрыболовством только в 2016 г., что может означать, что до этого периода времени улов не представлял значимой статистической величины (данные по динамике улова, территориальной структуре и видам добытых рыбных ресурсов представлены в табл. 5).

**Таблица 4.** Динамика вылова рыбы в Карском море в 2016-2024 гг. (тонн)

Вылов рыбы	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024 (9 м.)
Карское море всего, в том числе:	48	414	243	711	284	102	369	287	127
Обская губа		0	205	0	0	0	229	243	88
Тазовская губа		356		682	284	20	44	30	39
Гыданская губа		13		29	0	82	94	14	0
по видам рыбы									
Тресковые	1	-	1	1	-	-	120	1	0
Сайка	1	-	-	-	-	-	0	0	0
Карповые	-	1	0	5	5	1	1,00	0	2
Язь	-	1	0	5	4	1	0	0	0
Пресноводные	-	21	135	188	57	8	143	147	73
Сиговые	46	391	54	501	218	92	104	99	52
Корюшковые	-	-	53	10	-	-	1	40	0
Беспозвоночные	-	-	-	1	-	-			

Источник: составлено автором по данным Росрыболовства

Статистические данные показывают, что пока значимых уловов за исключением пресноводных рыб в заливах Карского моря не наблюдается. Основу улова составляют рыбные ресурсы в дельтах основных рек, которые перемещаются в заливы Карского моря. Однако уже появляются отдельные данные по морскому улову, в частности корюшки, трески и их подвинов.

В настоящее время полноценная объективная информация о рыбном потенциале Карского моря отсутствует. Представленная статистика по вылову рыбы

только показывает отдельные тренды появления рыбных ресурсов (к примеру трески) пригодных для коммерческого вылова.

## 5 Заключение

Ожидаемые климатические изменения в Арктике предполагают определенные сдвиги и трансформации в экономической структуре макрорегиона и, в частности, в отрасли рыбной добычи. Пока еще рано говорить об устойчивом тренде на изменение регионом промысла и роста улова в северных акваториях, где вылов рыбных ресурсов ранее отсутствовал из-за масштабной представленности арктического льда. Вместе с тем в среднесрочной перспективе (на горизонте 10-15 лет) северо-восток Баренцева моря, Карское море, а также срединные районы СЛО станут значимыми в хозяйственном отношении акваториями для промышленного улова рыбных ресурсов.

Большинство прогнозов указывают на сокращение площади ледяного покрова, что с высокой вероятностью увеличивает потенциальную площадь распространения многих видов рыбы, что частично уже наблюдается в Баренцевом море и по мере устойчивого сокращения площади льдов будет увеличиваться с распространением в сторону земли Франца-Иосифа, Новой земли, Карского моря.

Есть определенное сомнения полагать, что распространение основных атлантических видов рыбы будет всеохватывающим. Очевидно границы новых мест обитания будут пролегать по океаническому шельфу, что обусловлено в первую очередь кормовой базой.

Текущие направления миграции рыбы свидетельствуют, что в период 10-15 лет Россия будет одним из основных выгодоприобретателей климатических изменений в Арктики в части рыбных ресурсов.

Одной из наиболее важных акваторий для дальнейших исследований в части оценки рыбного ресурсного потенциала может стать Карское море. Хотя сейчас значимые рыбные ресурсы для коммерческого улова практически отсутствуют, за исключением крабовой добычи и уловы рыбы в заливах. Вместе с тем, сокращение льдов и постепенная миграция атлантических видов рыбы на северо-восток потенциально сможет создать устойчивые популяции пригодные для коммерческого улова.

### Благодарность

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

## Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва, 2022. – 104 стр. // <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf>

2. Polar Regions Chapter IPCC report // [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_CCP6.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_CCP6.pdf)
3. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Pp. 3–32.
4. Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. *Nature* 628, 551–557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>
5. Экономические эффекты климатических изменений в России // <https://ecfor.ru/publication/broshyura-ekonomicheskie-effekty-klimaticheskikh-izmenenii-v-rossii/>
6. Adolf K.Y. Ng & Dong-Wook Song (2018) Special issue on ‘Arctic shipping, transportation, and regional development’, *Maritime Policy & Management*, 45:4, 419–421, DOI: 10.1080/03088839.2018.1463472
7. Eliseev, D.O., Naumova, Y.V. Simulation of Transit Transportation along the Northern Sea Route under Climate Change. *Stud. Russ. Econ. Dev.* 32, 160–168 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1075700721020040>
8. Изменение климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы // Под редакцией академика РАН Б.Н. Порфирьева и члена-корреспондента РАН В.И. Данилова-Данильяна / Москва, 2022. ООО «НК», 514 с.
9. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts // <https://www.amap.no/documents/download/6890/inline>
10. Метеорологическая база ФГБУ «АНИИ» // <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17>
11. Leif Christian Stige Kristina Øie Kvile Climate warming drives large-scale changes in ecosystem function *Proc Natl Acad Sci USA* 114 (46) 12100–12102 <https://doi.org/10.1073/pnas.1717090114>
12. Chan FT, Stanislawczyk K, Sneekes AC, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob Change Biol.* 2019;25:25–38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>
13. Gamito, R., Costa, M.J. & Cabral, H.N. Fisheries in a warming ocean: trends in fish catches in the large marine ecosystems of the world. *Reg Environ Change* 15, 57–65 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0615-y>
14. L.L. Jørgensen, G. Bakke, A.H. Hoel, Responding to global warming: New fisheries management measures in the Arctic, *Progress in Oceanography*, Volume 188, 2020, 102423, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102423>
15. Chan FT, Stanislawczyk K, Sneekes AC, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob Change Biol.* 2019;25:25–38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>
16. Cheung, W. W. L., Dunne, J., Sarmiento, J. L., and Pauly, D. 2011. Integrating ecophysiology and plankton dynamics into projected maximum fisheries catch potential under climate change in the Northeast Atlantic. – *ICES Journal of Marine Science*, 68: 1008–1018.

17. Anne B. Hollowed et al. Projected impacts of climate change on marine fish and fisheries, ICES Journal of Marine Science, Volume 70, Issue 5, September 2013, Pages 1023–1037, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst081>
18. Hollowed, A.B., Planque, B. and Loeng, H. (2013), Potential movement of fish and shellfish stocks from the sub-Arctic to the Arctic Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 22: 355-370. <https://doi.org/10.1111/fog.12027>
19. Per Fauchald et al 2021 *Environ. Res. Lett.* 16 074057 // DOI 10.1088/1748-9326/ac1010
20. Zeller, D., & Pauly, D. (Daniel). (2007). Reconstruction of marine fisheries catches for key countries and regions (1950 - 2005) [R]. doi:<http://dx.doi.org/10.14288/1.0074755>
21. Ole Arve Misund et al. Norwegian fisheries in the Svalbard zone since 1980. Regulations, profitability and warming waters affect landings. *Polar Science*, Volume 10, Issue 3, 2016, Pages 312-322 // <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.02.001>.
22. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2022. — 684 с.
23. Tore Haug et al. Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: A review of possibilities and constraints // *Fisheries Research*, Volume 188, 2017, pp. 38-57. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.12.002>.
24. Ajiad, A.M., Oganin, I.A., Gjøsæter, H., 2011. Polar cod. In: Jakobsen, T., Ozhigin, V.K. (Eds.), *The Barents Sea. Ecosystem, Resources, Management. Half a Century of Russian-Norwegian Cooperation*. Tapir Academic Press, Trondheim, pp. 315–328.
25. Fossheim, M., Primicerio, R., Johannesen, E., Ingvaldsen, R.B., Aschan, M.A., Dolgov, A.V., 2015. Recent warming leads to rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nat. Clim. Change* 5, 673–678.
26. Filatova, Z.A. and Zenkevich, L.A., Quantitative distribution of the bottom fauna of the Kara Sea, *Tr. Vses. Gidrobiol. O-va*, 1957, vol. 8, pp. 3–67.
27. Antonov, N.P., Kuznetsov, V.V., Kuznetsova, E.N. et al. Ecology of Arctic cod *Boreogadus saida* (Gadiformes, Gadidae) and its fishery potential in Kara Sea. *J. Ichthyol.* 57, 721–729 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0032945217050022>
28. Карское море может стать одним из центров рыбодобычи в России // <https://tass.ru/v-strane/5029712>
29. Баканев С. В., Павлов В. А. Перспективы промысла краба-стригуна *Chionoecetes opilio* в Карском море // *Вопросы рыболовства*, 2020. Том 21. №4. С. 478–487
30. Российские ученые впервые одобрили добычу снежного краба // <https://lenta.ru/news/2021/10/27/krabb/>
31. Семушин А.В., Торцев А.М., Студёнов И.И. Коммерческое рыболовство в Карском море: проблемы и перспективы // *Экономика и управление: научно-практический журнал*, № 4 (154), 2020. С. 126-130
32. Slavin S.V. *Economic Development of the Siberian North Arctic*, vol. 17, no. 2, June 1964, pp. 104-108

---

**References**

1. Report on the Features of the Climate on the Territory of the Russian Federation for 2021. – Moscow, 2022. – 104 pages. // <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf>
2. Polar Regions Chapter IPCC report // [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_CCP6.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_CCP6.pdf)
3. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Pp. 3–32.
4. Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. *Nature* 628, 551–557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>
5. Economic Effects of Climate Change in Russia // <https://ecfor.ru/publication/broshyura-ekonomicheskie-effekty-klimaticheskikh-izmenenii-v-rossii/>
6. Adolf K.Y. Ng & Dong-Wook Song (2018) Special issue on ‘Arctic shipping, transportation, and regional development’, *Maritime Policy & Management*, 45:4, 419-421, DOI: 10.1080/03088839.2018.1463472
7. Eliseev, D.O., Naumova, Y.V. Simulation of Transit Transportation along the Northern Sea Route under Climate Change. *Stud. Russ. Econ. Dev.* 32, 160–168 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1075700721020040>
8. Climate Change and the Economy of Russia: Trends, Scenarios, Forecasts // Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences B.N. Porfiriyev and Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences V.I. Danilov-Danilyan / Moscow, 2022. LLC "NK", 514 pages.
9. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts // <https://www.amap.no/documents/download/6890/inline>
10. Meteorological Database of AARI // <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17>
11. Leif Christian Stige, Kristina Øie Kvile. Climate warming drives large-scale changes in ecosystem function. *Proc Natl Acad Sci USA* 114 (46): 12100-12102. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717090114>
12. Chan F.T., Stanislawczyk K., Sneekes A.C., et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob Change Biol.* 2019;25:25–38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>
13. Gamito, R., Costa, M.J. & Cabral, H.N. Fisheries in a warming ocean: trends in fish catches in the large marine ecosystems of the world. *Reg Environ Change* 15, 57–65 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0615-y>
14. L.L. Jørgensen, G. Bakke, A.H. Hoel, Responding to global warming: New fisheries management measures in the Arctic, *Progress in Oceanography*, Volume 188, 2020, 102423, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102423>
15. Chan FT, Stanislawczyk K, Sneekes AC, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob Change Biol.* 2019;25:25–38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>

16. Cheung, W. W. L., Dunne, J., Sarmiento, J. L., and Pauly, D. 2011. Integrating ecophysiology and plankton dynamics into projected maximum fisheries catch potential under climate change in the Northeast Atlantic. – *ICES Journal of Marine Science*, 68: 1008–1018.
17. Anne B. Hollowed et al. Projected impacts of climate change on marine fish and fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, Volume 70, Issue 5, September 2013, Pages 1023–1037. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst081>
18. Hollowed, A.B., Planque, B. & Loeng, H. (2013). Potential movement of fish and shellfish stocks from the sub-Arctic to the Arctic Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 22: 355–370. <https://doi.org/10.1111/fog.12027>
19. Per Fauchald et al. 2021. *Environ. Res. Lett.* 16: 074057. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1010>
20. Zeller, D., & Pauly, D. (Daniel). (2007). Reconstruction of marine fisheries catches for key countries and regions (1950–2005). DOI: <http://dx.doi.org/10.14288/1.0074755>
21. Ole Arve Misund et al. Norwegian fisheries in the Svalbard zone since 1980. Regulations, profitability, and warming waters affect landings. *Polar Science*, Volume 10, Issue 3, 2016, Pages 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.02.001>
22. State of the Environment and Environmental Protection in the Russian Federation in 2021. State Report. – Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2022. – 684 pages.
23. Tore Haug et al. Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: A review of possibilities and constraints. *Fisheries Research*, Volume 188, 2017, Pages 38–57. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.12.002>
24. Ajjad, A.M., Oganin, I.A., Gjørseter, H., 2011. Polar cod. In: Jakobsen, T., Ozhigin, V.K. (Eds.), *The Barents Sea. Ecosystem, Resources, Management. Half a Century of Russian-Norwegian Cooperation*. Tapir Academic Press, Trondheim, pp. 315–328.
25. Fossheim, M., Primicerio, R., Johannesen, E., Ingvaldsen, R.B., Aschan, M.A., Dolgov, A.V., 2015. Recent warming leads to rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nat. Clim. Change* 5, 673–678.
26. Filatova, Z.A. & Zenkevich, L.A. Quantitative distribution of the bottom fauna of the Kara Sea. *Tr. Vses. Gidrobiol. O-va*, 1957, Vol. 8, pp. 3–67.
27. Antonov, N.P., Kuznetsov, V.V., Kuznetsova, E.N., et al. Ecology of Arctic cod *Boreogadus saida* (Gadiformes, Gadidae) and its fishery potential in the Kara Sea. *J. Ichthyol.* 57, 721–729 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0032945217050022>
28. Kara Sea Could Become One of Russia's Centers of Fisheries // <https://tass.ru/v-strane/5029712>
29. Bakanov, S.V. & Pavlov, V.A. Prospects for the fishery of snow crab *Chionoecetes opilio* in the Kara Sea. *Fisheries Issues*, 2020, Vol. 21, No. 4, pp. 478–487.
30. Russian scientists approve snow crab fishing for the first time // <https://lenta.ru/news/2021/10/27/krabb/>
31. Semushin, A.V., Tortsov, A.M., & Studyonov, I.I. Commercial fishing in the Kara Sea: Problems and prospects. *Economics and Management: Scientific and Practical Journal*, No. 4 (154), 2020, pp. 126–130.
32. Slavin, S.V. Economic Development of the Siberian North. *Arctic*, Vol. 17, No. 2, June 1964, pp. 104–108.

## **Fish Resources of the Western Waters of the Russian Arctic in the Context of Climate Change: Potential and Prospects for Development**

Ismailova Elmira

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

E-mail: `ismailova.e.a@campus.mse-msu.ru`

**Abstract.** This review article examines the impact of climate change on the potential of fish resources. The methodological part of the work shows that changes in the temperature regime of water in the world's oceans and certain chemical composition indicators force fish populations to change their habitual habitats. From the water areas affected by rising temperatures, fish migrate to northern latitudes. In turn, the reduction of the polar ice area contributes to the emergence of sustainable fish populations in the seas of the Arctic Ocean. The possibilities of increasing fish catch in the Northeastern part of the Barents Sea and the Kara Sea are considered. It is shown that, taking into account current climatic trends, an increase in fish catch in the Russian part of the Barents Sea and the start of commercial production in the Kara Sea is possible in the medium term. A possible forecast of migration of certain fish species in the Barents Sea has been compiled.

**Keywords:** climate change, Arctic fish resources, fishing, fish population. The Barents Sea, the Kara Sea

### **Acknowledgements**

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. FMWE-2024-0017).

УДК 621.383

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-80-88

EDN: LVRFB

## Причины сокращения сроков работы солнечных модулей и способы их предотвращения

<sup>1,1</sup> Кирпичникова Ирина Михайловна<sup>[0000-0002-4078-8790]</sup>,<sup>1,2</sup> Серов Виктор Алексеевич<sup>[0009-0003-6415-2935]</sup>,<sup>1,3</sup> Заварухин Владимир Александрович<sup>[0009-0001-0810-1717]</sup>,<sup>1,4</sup> Слетова Екатерина Дмитриевна<sup>[0009-0006-0664-5717]</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

E-mail: <sup>1</sup>kirpichnikovaim@susu.ru, <sup>2</sup>va\_serov99@mail.ru,  
<sup>3</sup>zavaruhin-425@yandex.ru, <sup>4</sup>sletovakatya@yandex.ru

**Аннотация.** Для поддержания эффективности работы фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях необходимо проводить своевременную диагностику состояния модулей для предотвращения сокращения срока их работы. Причинами сокращения могут быть условия окружающей среды, механические повреждения, несоблюдение условий эксплуатации и другие. Наиболее точным методом определения состояния модулей является анализ их вольтамперных характеристик, форма которых может изменяться в зависимости от освещенности, температуры и возможных видов деградации.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические модули, деградация, вольтамперная характеристика

### 1 Введение

Наряду со стремительным развитием гелиоэнергетики и введением новых мощностей на солнечных электростанциях неизбежно возникают проблемы при эксплуатации фотоэлектрических модулей (ФЭМ), которые играют ключевую роль в системах возобновляемой энергии. Несмотря на то, что модули рассчитаны на длительную эксплуатацию (обычно от 20 до 30 лет), существует ряд факторов, которые могут привести к преждевременному выходу из строя этих устройств [1]. Обнаружить возникающие дефекты только путем визуального осмотра крайне сложно. Это объясняется тем, что модуль представляет собой цепь ячеек, последовательно соединенных между собой для набора необходимой мощности. Построение солнечных электростанций производится по такому же



принципу последовательного соединения ФЭМ в цепи для достижения расчетного напряжения системы. Такая сборная цепь создает проблему при поиске поврежденных ячеек и требует как визуального контроля, так и проведения измерений.

Своевременное обнаружение дефектов, выявление причин сокращения сроков эксплуатации ФЭМ вследствие их разрушения или снижения мощности, а также разработка методов обнаружения и диагностирования состояния модулей, является важной задачей.

## 2 Основная часть

Сокращение сроков эксплуатации фотоэлектрических модулей происходит, прежде всего, под действием окружающей среды и различных природных условий, таких как дождь, снег, ветер, ультрафиолетовое излучение и экстремальные температуры. УФ-излучение может разрушать полимерные материалы, используемые в конструкциях модулей, такие как защитные покрытия и уплотнители, что приводит к деградации модуля.

Резкие изменения температур могут приводить к термическому стрессу, который вызывает микротрещины в элементах модуля. Влага, попадающая внутрь модуля через поврежденную оболочку, может способствовать коррозии металлических компонентов и ухудшению электрических характеристик. Пыль, грязь, птичий помет и другие виды загрязнений могут оседать на поверхности солнечных модулей, блокируя доступ света к фотоэлементам, что приводит к снижению выработки электроэнергии. Особенно эта проблема актуальна в регионах с высокой концентрацией пыли, например, в пустынных районах.

Сильный ветер, град или другие механические воздействия могут повредить стекло или корпус модуля, снижая тем самым эффективность его работы.

Негативное влияние на работу фотоэлектрических модулей оказывает качество материалов и ошибки при сборке, например, некачественная герметизация может привести к проникновению влаги и пыли внутрь модуля и ускорит процесс деградации

Фотоэлектрические элементы, составляющие основу солнечных модулей также подвержены деградации, которая возникает как вследствие естественного старения, так и при неправильной эксплуатации. Это проявляется в потере прозрачности защитного стекла, разрушении антирефлективного покрытия, появлении микроразрывов и трещин в полупроводниковых материалах.

Неисправность таких элементов и устройств преобразования энергии как инверторы и контроллеры заряда также влияют на работу всей системы в целом. Перегрев инвертора может привести к повреждению электронных компонентов и снижению эффективности системы. Ошибки в подключении бывают причиной перегрузки системы и выхода из строя отдельных элементов. Электронные компоненты инвертора и контроллера заряда также подвержены износу и могут выйти из строя раньше заявленного срока работы.

Еще одной серьезной причиной преждевременного выхода из строя фотоэлектрических модулей может быть несоответствие условиям эксплуатации. Если солнечная система была спроектирована без учета местных климатических условий, она скорее всего, быстро выйдет из строя. Например, установка систем в условиях повышенной влажности без соответствующей защиты может ускорить процессы коррозии и деградации.

Для того чтобы предотвратить ранний выход из строя солнечных модулей и максимально продлить их срок службы, существует несколько эффективных методов. На этапе проектирования и монтажа важно выбирать проверенных производителей. Зарекомендовавшие себя на рынке надежные компании, как правило, используют качественные материалы и передовые технологии производства.

На этапе эксплуатации важно применять возможные способы и устройства защиты модулей от воздействий окружающей среды. Это может быть применение специальных покрытий поверхности модулей от воздействия ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, обеспечение надежной герметизации модулей, что предотвращает попадание влаги и пыли внутрь, применение теплоизоляционных материалов для снижения тепловых нагрузок на модули, особенно в жарких климатических зонах.

Периодическая очистка модулей от пыли, грязи и других видов загрязнений улучшает их способность поглощать солнечный свет и генерировать энергию, а регулярные проверки электрических соединений и контактов позволяют вовремя обнаружить возможные проблемы и устранить их.

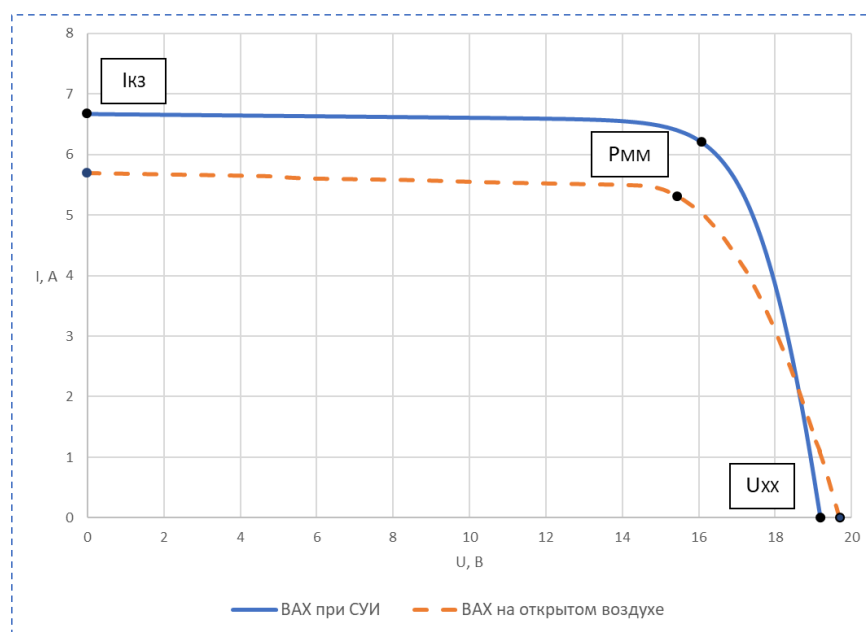
Эти методы помогут существенно повысить надежность и долговечность солнечных модулей, минимизировав риск их преждевременного выхода из строя. Однако, значительно может продлить срок службы фотоэлектрических модулей своевременная диагностика, выявление неисправностей и проведение ремонтных работ.

### **3 Материалы и методы**

Одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния ФЭМ является анализ их вольтамперных характеристик (ВАХ). ВАХ отражает зависимость тока, протекающего через ФЭМ, от напряжения на его выходе при определенных условиях инсоляции и температуры. Данная характеристика снимается производителем модулей при стандартных условиях испытаний (СУИ): освещенности, равной  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , температуре окружающей среды  $+ 25^\circ\text{C}$ , спектре излучения AM1,5 и отсутствии ветра.

Изменения в ВАХ могут свидетельствовать о наличии неисправностей или деградации материалов ФЭМ. Слежение за деградацией ФЭМ в условиях окружающей среды является сложной задачей, требующей корректировки полученных значений их мощностных характеристик для сравнения с паспортными данными производителя, полученными в лабораторных условиях.

Чаще всего, при эксплуатации модулей в реальных условиях эксплуатации невозможно добиться параметров освещенности и температуры, которые используются при стандартных испытаниях. Различные вариации температуры и освещенности влияют на выходные параметры мощности ФЭМ. На рисунке 1 показана ВАХ, полученная при стандартных условиях испытаний и ВАХ при работе модуля в реальных условиях.



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики, полученные при стандартных условиях испытаний и при работе модулей в реальных условиях эксплуатации.

В реальных условиях эксплуатации освещенность и температура окружающей среды влияют на напряжение холостого хода  $U_{x.x.}$  и ток короткого замыкания  $I_{k.z}$ . При этом меняется и положение точки максимальной мощности модуля  $P_{m.m.}$ , при которой обеспечивается номинальная выработка энергии. По изменению формы вольт-амперной характеристики можно установить причину изменения этих параметров при приведении ее к стандартной ВАХ.

Основными способами приведения ВАХ к СУИ являются экстраполяция и интерполяция. Экстраполяция используется для определения значений ВАХ за пределами измеренного диапазона (например, при очень высокой или очень низкой освещенности). Интерполяция используется для определения значений ВАХ внутри измеренного диапазона [2,3].

Для приведения ВАХ к СУИ также применяются температурные коэффициенты и коэффициенты освещенности. Температурный коэффициент тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и мощности позволяют определять

изменение этих параметров при изменении температуры. Применение данных коэффициентов используется для корректировки параметров ФЭМ с учетом температуры модуля. Коэффициент освещенности позволяет определить изменение параметров ФЭМ при её изменении. Данный коэффициент используется для корректировки параметров ФЭМ с учетом инсоляции.

С целью снижения погрешности измерений требуется получение точных данных по температуре и освещенности на территории солнечной электростанции. При измерении температуры обычно применяют ручной способ определения нагрева модулей, что приводит к появлению погрешности из-за одновременного проведения измерений, которое чаще всего проходит в течение длительного промежутка времени.

Для измерения температуры солнечных модулей можно использовать более современные и эффективные методы, например использование датчиков температуры. Встроенные датчики в модулях или установленные на них, позволяют автоматически и с высокой точностью проводить измерения. Они обычно устанавливаются на задней стороне модуля и измеряют его температуру непосредственно. Плюсами такого метода мониторинга является высокая точность измерений и возможность создания системы мониторинга температуры в реальном времени. Однако установка датчиков ведёт к дополнительным затратам, а также усложняет прокладку проводки для подключения датчиков к системе мониторинга.

В процессе эксплуатации модули подвергаются внешним и внутренним факторам, которые влияют на их деградацию. Снижение мощности может иметь временный характер и постоянный. Это означает, что кроме определения состояния модулей, необходимо также определить причину снижения мощности ФЭМ.

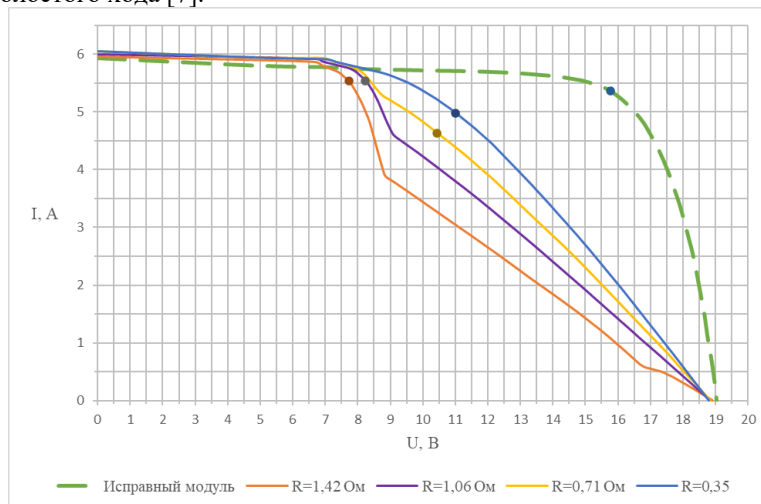
На солнечных модулях устанавливаются шунтирующие диоды, которые защищают ячейки от их локального перегрева ячеек (hot-spot), вызванного неравномерным освещением или затенением части последовательно соединенных модулей [4].

Затенение может быть вызвано облачностью или передвигающимися объектами, препятствующими равномерному попаданию света, а также наличием адгезивных загрязнителей на поверхности модулей. В этом случае затенение является временным и самоустраняется через короткий промежуток времени, не причиняя вреда ФЭМ. Адгезивные загрязнения требуют вмешательства, поскольку их устранение возможно только путем применения специальных механизмов: щеток, моющих устройств, а также установок по очистке от мелкодисперсной пыли воздействием электростатических полей [5].

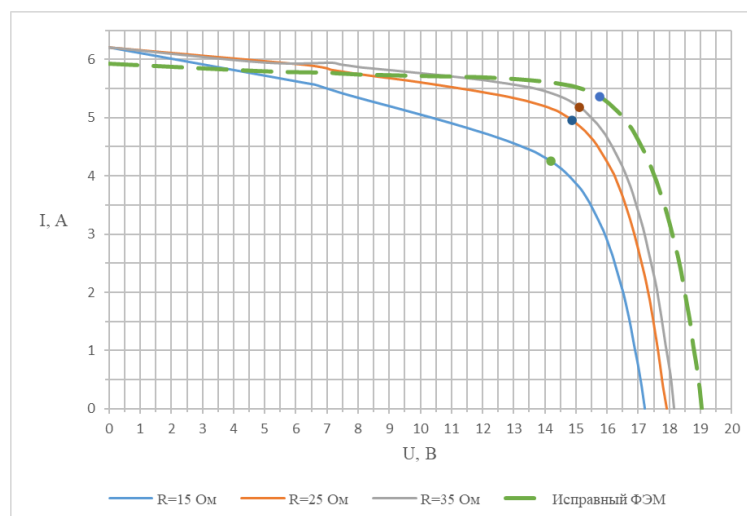
Серьезную проблему представляет затенение, вызванное локальным потемнением герметизирующего слоя в местах расположения ячеек. Такое явление возникает из-за некачественных материалов и может вызвать необратимую деградацию модуля.

Работа шунтирующего диода, кроме затенений, позволяет определить проблемы с контактными соединениями или проблемы с ячейками, вызванными увеличением последовательного сопротивления. Появление такого сопротивления

также заметно по изменению формы графика ВАХ (рисунок 2), когда меняется наклон прямолинейного участка графика от точки максимальной мощности до точки холостого хода [7].



**Рис. 2.** Влияние последовательного сопротивления на форму графика ВАХ.



**Рис. 3.** Влияние шунтирующего сопротивления на форму графика ВАХ

При достижении значения сопротивления, при котором открывается шунтирующий диод, ВАХ имеет форму, отличную от формы графика при затенении, что

позволяет выявить проблему и своевременно применить необходимые меры по ее устранению. Одним из показателей качества ячеек в модулях является их шунтирующее сопротивление, значение которого должно быть неизменно высоким. Снижение такого сопротивления в течение эксплуатации свидетельствует о низком качестве ячеек и выражается на графике ВАХ наклоном прямолинейного участка от точки короткого замыкания до точки максимальной мощности [7].

На рисунке 3 изображено влияние шунтирующего сопротивления на форму графика ВАХ. Изменение шунтирующего сопротивления ячеек является необратимым процессом и требует замены неисправного модуля.

Таким образом, анализируя форму ВАХ фотоэлектрического модуля, можно с большой вероятностью установить причину отклонения параметров от стандартной характеристики изготовителя.

## Заключение

В процессе эксплуатации фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях они могут подвергаться различным влияниям окружающей среды или другим явлениям, приводящим к их разрушению, деградации, снижая тем самым срок работы модулей и электростанции в целом. Установить причины и предотвратить снижение срока эксплуатации позволяет анализ вольтамперных характеристик фотоэлектрических модулей, который является эффективным инструментом для определения состояния ФЭМ и выявления различных неисправностей. Анализ проводится путем сопоставления параметров работающих в реальных условиях ФЭМ с параметрами ВАХ, полученных при стандартных условиях испытаний. Это позволяет наиболее точно оценивать состояние модулей в разных условиях эксплуатации.

Совершенствование методики диагностики ФЭМ на солнечных электростанциях может быть при использовании автоматической системы слежения за состоянием модулей для своевременного устранения причин снижения генерации энергии и уменьшения срока службы фотоэлектрических модулей.

## Литература

1. Кирпичникова И. М. Проблемы деградации солнечных модулей и пути ее решения // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы. 2023. С. 92–97.
2. Hishikawa Y., Ohshima H., Higa M. Extended Linear Interpolation/Extrapolation Procedure for Accurate and Versatile Translation of the I-V Curves of PV Cells and Modules // IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2017. P. 441-444.
3. Montes-Romero J., Torres-Ramírez M., de la Casa J. Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic modules // Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE). 2016. P. 1-7.

4. Кирпичникова, И.М., Серов В. А. Использование байпасных диодов для защиты солнечных модулей от деградации при затенении // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере. 2024. Т.12. № 1. С.31-34.
5. Заварухин В.А., Кирпичникова И. М., Шестакова В. В. Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей. Патент на полезную модель 218045 U1, 04.05.2023. Заявка № 2023107268 от 27.03.2023.
6. Understanding the degradation phenomenon in solar panels [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.novergysolar.com/understanding-the-degradation-phenomenon-in-solar-panels/>
7. Кирпичникова И. М., Заварухин В.А., Слетова Е. Д. Выбор параметров вольтамперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 3. С.15-21.

## Reference

1. Kirpichnikova I.M. Problems of degradation of solar modules and ways to solve it // Small power engineering: problems, tasks and prospects. 2023. P. 92-97.
2. Hishikawa Y., Ohshima H., Higa M. Extended Linear Interpolation/Extrapolation Procedure for Accurate and Versatile Translation of the I-V Curves of PV Cells and Modules // IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2017. P. 441-444.
3. Montes-Romero J., Torres-Ramírez M., de la Casa J. Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic modules // Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE). 2016. P. 1-7.
4. Kirpichnikova, I.M., Serov V.A. Using bypass diodes to protect solar modules from degradation during shading // Energy and resource saving in heat power engineering and the social sphere. 2024. Vol.12. No. 1. P. 31–34.
5. Zavarukhin V.A., Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. Device for preventing pollution and degradation of solar modules. Patent for utility model 218045 U1, 04.05.2023. Application No. 2023107268 dated 27.03.2023.
6. Understanding the degradation phenomenon in solar panels [Electronic resource]. – URL: <https://www.novergysolar.com/understanding-the-degradation-phenomenon-in-solar-panels/>
7. Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Sletova E.D. Selection of parameters of the current-voltage characteristic to determine possible causes of degradation of photovoltaic modules // Energy safety and energy saving. 2024. No. 3. P.15-21.

## Causes of Shortened Operation Time of Photovoltaic Modules and Ways to Prevent Them

<sup>1,1</sup> Irina Kirpichnikova, <sup>1,2</sup> Viktor Serov, <sup>1,3</sup> Vladimir Zavarukhin, <sup>1,4</sup> Ekaterina Sletova

<sup>1</sup> South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, 454080, Russia

E-mail: <sup>1</sup> kirpichnikovaim@susu.ru, <sup>2</sup> va\_serov99@mail.ru,  
<sup>3</sup> zavaruhin-425@yandex.ru, <sup>4</sup> sletovakatya@yandex.ru

**Abstract.** To maintain the efficiency of photovoltaic modules at solar power plants, it is necessary to conduct timely diagnostics of the module condition to prevent a reduction in their service life. The reasons for the reduction may be environmental conditions, mechanical damage, non-compliance with operating conditions, etc. The most accurate method for determining the condition of modules is the analysis of their volt-ampere characteristics, the shape of which may change depending on illumination, temperature, and possible types of degradation.

**Keywords:** photovoltaic modules, degradation, voltampere characteristics



УДК 338.27

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-89-105

EDN: RZSUWI

## Территории размещения различных видов энергоисточников в Республике Беларусь: экономическая оценка экологического ущерба

Матюшенко Ангелина Дмитриевна <sup>[0009-0007-4279-2420]</sup>

Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Беларусь

E-mail: admatyushenko@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье представлена экономическая оценка экологического ущерба сельскохозяйственных ресурсов в контексте строительства и эксплуатации различных типов установок для генерации как возобновляемой, так и невозобновляемой энергетики на сельскохозяйственных территориях Республики Беларусь. Оценены показатели прибыли от генерации электрической энергии с учетом экономического ущерба и выполнено прямое ранжирование на основе различных характеристик электростанций. При этом учтены такие показатели, как средняя фиксированная рыночная стоимость зерна, средняя урожайность зерновых культур, площадь, необходимая для строительства электростанций, установленная мощность, годовая выработка электроэнергии и производственная себестоимость электростанции.

**Ключевые слова:** энергетика, электростанции, сельскохозяйственные земли, зерновые культуры, экономическая оценка, экологический ущерб.

### 1 Введение

В условиях глобального изменения климата и нарастающей энергетической зависимости Республике Беларусь необходимо оптимизировать свои энергетические ресурсы для обеспечения устойчивого развития. Энергетическая система страны традиционно базируется на ископаемых видах топлива и атомной энергетике, однако растущее понимание экологических последствий использования различных источников энергии требует переосмысления подхода к их использованию и эксплуатации. При этом важно оценивать не только экономическую эффективность, но и потенциальный экологический ущерб природным экосистемам и здоровью населения.

При размещении источников энергии, таких как угольные, газовые и нефтяные электростанции, а также атомные электростанции и возобновляемые источники, такие как солнечная и ветровая энергия, гидроэнергия, энергия, вырабатываемая на биомассе и биогазе имеют свои уникальные экологические риски и влияние. Неправильное размещение этих объектов может привести к серьезным экологическим и социальным проблемам, включая загрязнение воздуха и воды, утрату биоразнообразия и негативное воздействие на здоровье населения.

Негативное влияние невозобновляемых природных энергоресурсов на окружающую среду и здоровье человека рассматривают в своих работах И. Н. Семенина, В. А. Переверзев, анализируя следующие энергоресурсы: нефть, уголь, газ, горючие сланцы, торф, уран [1], Минги Ю анализирует прямые и потенциальные эффекты от использования традиционных источников энергии [2], С.В. Захаров, В.П. Лушпей, Л.Р. Аббасова и С. Жонгкай описывают следующие экологические проблемы: парниковый эффект, разрушение озонового слоя, фотохимический смог, кислотные дожди, деградация почв, обезлесение, опустынивание, проблемы с отходами, сокращение генофонда биосферы [3].

Отрицательные последствия для среды и общества от строительства станций на возобновляемой энергетике исследуют П. П. Проценко, Т. А. Николаева [4], О. В. Маслеева, А. Ю. Кечкин анализируют последствия воздействия на окружающую среду при эксплуатации станций [5], В.В. Шестакова рассматривает эффект отдачи от сокращения использования ВИЭ [6], Ю. И. Соколов описывает риски ВИЭ [6], Р. Х. Азиева, Х. А. Мунаева проводят оценку социальных последствий от внедрения различных возобновляемых источников энергии [7].

Сравнительный анализ влияния объектов традиционной и альтернативной энергетике на окружающую среду проводят Ю. С. Борисова, Н. С. Самарская [9], также ранее и автор осуществлял сравнительный анализ различных видов производства энергии с точки зрения их экономической эффективности и воздействия на окружающую среду [10]. К.С. Дегтярев осуществляет сопоставление ветряной и угольной энергетике, основываясь на стадиях жизненного цикла [11], Аль Мубарак Ф., Резай Р., Вуд Д.А. оценивают экономические, социальные и экологические последствия использования доступных источников энергии [12].

## 2 Материалы и методы

Одним из основных негативных экологических воздействий на окружающую среду при возведении электростанций является потеря сельскохозяйственных земель, приводящая к ряду неблагоприятных последствий для природы и экосистем.

Во-первых, одним из наиболее очевидных последствий является сокращение биологического разнообразия. На сельскохозяйственных землях часто обитает множество видов растений и животных. Их изъятие для строительства разрушает естественную среду обитания, что может привести к сокращению или полному

исчезновению местных популяций. Потеря видов, в свою очередь, негативно сказывается на устойчивости экосистем, поскольку снижает их способность к саморегуляции и восстановлению.

Во-вторых, изменение землепользования может привести к деградации почв. Сельскохозяйственные земли, как правило, обрабатываются агрономическим способом, а их перепрофилирование в промышленно развитых районах может нарушить структуру почвы, снизить ее плодородие и привести к эрозии. Кроме того, уплотнение почвы в результате строительства может негативно повлиять на водопроницаемость и, следовательно, увеличить поверхностный сток, что может привести к эрозии и загрязнению водоемов.

Третье негативное последствие – воздействие на гидрологические процессы. Строительство электростанций часто связано с изменением ландшафта, что может нарушить естественные водные потоки и привести к изменению местного гидрологического режима. Это приводит к перераспределению водных ресурсов, что негативно скажется на сельскохозяйственном производстве и водоснабжении соседних районов.

Четвертый аспект – потенциальное загрязнение экосистем. Токсичные вещества, такие как тяжелые металлы и химикаты, могут выбрасываться в атмосферу на всех этапах строительства и эксплуатации электростанций, а также загрязнять воздух, воду и почву. Эти факторы могут оказать долгосрочное негативное воздействие на здоровье экосистем, флоры и фауны.

Наконец, нельзя недооценивать социальные последствия таких решений. Устойчивое развитие сельских районов зависит от сочетания экологических и экономических факторов, и замена сельскохозяйственных земель на промышленные может привести к социальным конфликтам, потере рабочих мест и ухудшению качества жизни местного населения.

Таким образом, изъятие сельскохозяйственных земель для строительства электростанций имеет значительные негативные последствия для природы и экосистемы и требует тщательного рассмотрения и взвешивания при планировании и реализации подобных проектов. В том числе стоит оценивать рациональность и экономическую выгоду при строительстве электростанций замещая, например, выращивание зерновых культур на сельскохозяйственных землях.

Для экономической оценки ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель, рассчитаем среднюю стоимость собранного зерна на 1 гектар земли, учитывая фиксированные цены на сельскохозяйственную продукцию и урожайности зерновых культур (1):

$$P_3 = P_{fix} \times U \quad (1)$$

где  $P_3$  – стоимость собранного зерна на 1 гектар земли;  $P_{fix}$  – средняя фиксированная рыночная стоимость зерна;  $U$  – средняя урожайность зерновых культур.

В данном исследовании был выполнен прогноз на пятилетний период (2025-2029 гг.) на основе данных о средней фиксированной стоимости зерна в Респуб-

лике Беларусь, которые были собраны за период 2004-2024 гг. В качестве объектов анализа были выбраны ключевые зерновые культуры, включая ячмень, используемый для продовольственных целей и пивоваренный ячмень, а также пшеница, рожь, овес, гречиха и просо.

Основой для установления фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (продукцию растениеводства), закупаемую для государственных нужд республики послужили Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 11 марта 2004 г. №56, 12 июля 2005 г. № 769, 29 марта 2006 г. № 427, 14 мая 2007 г. № 587, 25 апреля 2008 г. № 613, 6 июля 2009 г. № 900, 20 июля 2010 г. № 1082, 8 февраля 2011 г. № 156 и Постановления Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 3 апреля 2012 г. № 20, 17 июня 2013 г. № 25, 19 марта 2014 г. № 6, 30 марта 2015 г. № 11, 24 марта 2016 г. № 13, 23 февраля 2017 г. № 16, 27 марта 2018 г. №34, 13 марта 2019 г. № 18 , 11 марта 2020 № 12, 2 марта 2021 г. № 17, 21 марта 2022 г. №22, 14 марта 2023 г. № 33, 26 марта 2024 г. № 26 (таблица 1) [13–33].

Для анализа временного ряда использовались методы линейного и полиномиального тренда, что позволило выявить тенденцию в развитии цен на зерно и построить на ее основе прогноз.

Средняя фиксированная рыночная стоимость зерна с 2004 по 2024 гг. представлены в таблице 1 и прогноз этих показателей с 2025 по 2029 гг. полиномиальным методом. В период с 2004 по 2015 годы значения переведены в денонмированные рубли для корректности расчетов, а также все значения переведены по среднему курсу белорусского рубля к российскому рублю, рассчитанный как средняя геометрическая величина для каждого года (на период с 2025 по 2029 годы среднегодовой курс российского рубля также был спрогнозирован) [34].

**Таблица 1.** Средняя фиксированная рыночная стоимость зерна, закупаемая для республиканских нужд в Республике Беларусь с 2004 по 2029 гг.

Средняя фиксированная рыночная стоимость зерна за 1 ц, рос. руб.	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
	341,47	322,17	322,17	359,79	505,40	497,16	516,87
	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
	416,50	477,82	614,85	650,66	689,64	771,68	800,36
	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>
	879,53	902,64	897,73	915,05	1063,78	1236,48	1249,91
	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>		
	1 275,44	1 350,61	1 430,04	1 514,11	1 603,24		

Источник – [13–33]

Урожайность зерновых культур в Республики Беларусь рассматривалась с 2004 по 2024 годы для учета изменчивости и нестабильности сбора урожая при влиянии различных природно-климатических, экономических и агрономических

факторов, значения с 2025 по 2029 годы были рассчитаны с помощью метода скользящей средней с использованием 4 периодов (таблица 2) [35].

**Таблица 2.** Урожайность зерновых культур с 2004 по 2029 гг. в Республике Беларусь

Урожайность зерновых культур, 1 ц/га	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
	29,6	28,1	24,9	28,5	35,2	33,3	27,7
	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
	32,2	34,4	29,7	36,7	36,5	31,5	33,2
	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>
	32,2	34,4	29,7	36,7	36,5	31,5	33,2
	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>		
	32,8	33,6	33,4	33,4	33,3		

Источник – [35]

Если исходить из прогнозируемой средней фиксированной рыночной стоимости зерна, равной в 2025 году – 1 275,44 рос.руб., в 2026 г. – 1 350,61 рос. руб., в 2027 г. – 1 430,04 рос.руб., в 2028 г. – 1 514,11 рос. руб., в 2029 г. – 1 603,24 рос. руб. и средней урожайности по республике в 2025 году – 32,8 центнеров на 1 га, в 2026 г. – 33,6 ц/га, в 2027 г. – 33,4 ц/га, в 2028 г. – 33,4 ц/га, в 2029 г. – 33,3 ц/га, то средняя рыночная стоимость собранного зерна на 1 га, рассчитанная по формуле (1), составит в 2025 году – 41 834,43 рос.руб. на 1 га, в 2026 г. – 45 380,5 рос. руб. на 1 га, в 2027 г. – 47 763,34 рос.руб. на 1 га, в 2028 г. – 50 571,27 рос. руб. на 1 га, в 2029 г. – 53 387,89 рос. руб. на 1 га.

В качестве объекта исследования были рассмотрены различные крупнейшие установки генерации электроэнергии на территории Республики Беларусь:

- 1) Белорусская атомная электростанция (АЭС) [36];
- 2) Минская ТЭЦ-5 (ТЭС) [37];
- 3) Ветроэлектростанция вблизи деревни Асмиловичи Мстиславского района Могилевской области (ВЭС) [38];
- 4) Солнечная электростанция в Речицком районе Гомельской области (СЭС) [39];
- 5) Витебская гидроэлектростанция (ГЭС) [35];
- 6) Белорусская ГРЭС на местных видах топлива (древесное и торфяное) (Биомасса) [40];
- 7) Биогазовая установка на полигоне ТКО «Тростенец» (Биогаз) [41].

Рассчитаем экономическую оценку ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель по формуле (2):

$$R = S \times P_3 \quad (2)$$

где  $R$  – экономическая оценка ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель;  $S$  – площадь электростанции;  $P_3$  – стоимость собранного зерна на 1 гектар земли.

Для подсчета прибыли, получаемой при генерации электроэнергии воспользуемся формулой (3):

$$Pr = W_3 \times k - W_3 \times C \quad (3)$$

где  $Pr$  – получаемая прибыль при генерации электроэнергии;  $W_3$  – годовая выработка электроэнергии;  $k$  – усредненный (средневзвешенный) тариф на электроэнергию;  $C$  – производственная себестоимость электростанции.

Технико-экономические показатели различных типов электростанций в Республике Беларусь представлены в таблице 3 [36–42].

**Таблица 3.** Технико-экономические показатели различных типов электростанций в Республике Беларусь

Виды энергоустановок	Площадь электростанции, га	Установленная мощность, МВт	Годовая выработка электроэнергии, млн кВт*ч	Производственная себестоимость, рос. руб. /кВт*ч (по курсу НБРБ на 04.02.2025, 1 USD = 99,43 RUB)
АЭС	450	2400	34 962,64	76,56
ТЭС	254,92	719,6	2 587,59	132,25
ВЭС	1,93	3,4	10,61	29,83
СЭС	115	55	79,09	35,8
ГЭС	3	40	138	33,81
Биомасса	35	3399,76	11,88	190,91
Биогаз	0,27	3,4	28,53	85,51

Источник – [36–42]

Показатель усредненного (средневзвешенного) тарифа на электроэнергию будет равен 952,54 рос. руб. /кВт\*ч (по курсу НБРБ на 04.02.2025, 1 USD = 99,43 RUB) [43].

Вычислим прибыль, оставшуюся после выплаты экономического ущерба по формуле (4):

$$E = Pr - R \quad (4)$$

где  $E$  – экономическая прибыль, оставшаяся после выплаты экономического ущерба;  $Pg$  – получаемая прибыль при генерации электроэнергии;  $R$  – экономическая оценка ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель.

### 3 Результаты и обсуждение

Результаты расчета экономической оценки ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель (2) и прибыли, получаемой при генерации электроэнергии (3) сведены в таблице 4.

**Таблица 4.** Расчет экономической оценки ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель и прибыли от генерации электроэнергии на различных типах установок

Виды энергоустановок	Экономическая оценка ущерба при изъятии сельскохозяйственных земель, рос. руб.					Прибыль от генерации электроэнергии, млн. рос. руб.
	2025	2026	2027	2028	2029	
АЭС	18,83	20,42	21,49	22,76	24,02	30 626,57
ТЭС	10,66	11,57	12,18	12,89	13,61	2 122,57
ВЭС	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	9,79
СЭС	4,81	5,22	5,49	5,82	6,14	72,50
ГЭС	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	126,78
Биомасса	1,46	1,59	1,67	1,77	1,87	9,05
Биогаз	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	24,74

Таким образом, атомная электростанция демонстрирует экономический ущерб в размере 30 626,57 тыс. рос. рублей, что оказывает существенное влияние на сельскохозяйственные ресурсы. В то же время прибыль от производства электроэнергии составляет с 2025 по 2029 годы составляет 18,83 – 24,02 млн. рос. рублей. Несмотря на значительный объем ущерба, прибыль остается на достаточно высоком уровне, что может свидетельствовать о высокой эффективности работы АЭС.

Расчетный экономический ущерб тепловой электростанции составляет от 10,66 млн. рос. руб. в 2025 году до 13,61 млн. рос. рублей в 2029 году, значительно меньше, чем у АЭС, хотя она также существенно сказывается на экосистеме. Выгода от выработки электроэнергии составляет 2122,57 млн. рос. рублей, означающая положительный экономический эффект, хотя и менее весомый, чем у АЭС.

Экономический ущерб от ветровой электростанции оценивается от 0,08 млн. рос. рублей до 0,1 млн. рос. рублей за 5 летний период, предполагая минимальное воздействие на сельскохозяйственные угодья. Выгода от производства электроэнергии составляет 9,79 млн. рос. рублей. Несмотря на низкий уровень ущерба,

общая выгода также невелика из-за меньшей установленной мощности и годового производства электроэнергии.

**Таблица 5.** Прибыль, оставшаяся после выплаты экономического ущерба в 2025-2029 гг.

Виды энергоустановок	Прибыль от генерации электроэнергии после выплаты экономического ущерба, млн. рос. руб.				
	2025	2026	2027	2028	2029
АЭС	30 607,75	30 606,15	30 605,08	30 603,82	30 602,55
ТЭС	2 111,91	2 111,01	2 110,40	2 109,68	2 108,96
ВЭС	9,71	9,70	9,70	9,69	9,69
СЭС	67,69	67,29	67,01	66,69	66,37
ГЭС	126,66	126,65	126,64	126,63	126,62
Биомасса	7,58	7,46	7,38	7,28	7,18
Биогаз	24,73	24,72	24,72	24,72	24,72

**Таблица 6.** Прямое ранжирование электрических установок по прибыли, оставшейся после выплаты экономического ущерба в 2025 году

Виды энергоустановок	Прибыль от генерации электроэнергии после выплаты экономического ущерба		Отношение прибыли от генерации электроэнергии после выплаты экономического ущерба к площади установки		Отношение прибыли от генерации электроэнергии после выплаты экономического ущерба к установленной мощности	
	млн. рос. руб.	Ранг	млн. рос. руб. / га	Ранг	млн. рос. руб. / МВт	Ранг
АЭС	30 607,75	<b>1</b>	68,02	<b>2</b>	12,75	<b>1</b>
ТЭС	2111,91	<b>2</b>	8,28	<b>4</b>	2,93	<b>4</b>
ВЭС	9,71	<b>6</b>	5,03	<b>5</b>	2,86	<b>5</b>
СЭС	67,69	<b>4</b>	0,59	<b>6</b>	1,23	<b>6</b>
ГЭС	126,66	<b>3</b>	42,22	<b>3</b>	3,17	<b>3</b>
Биомасса	7,58	<b>7</b>	0,22	<b>7</b>	0,002	<b>7</b>
Биогаз	24,73	<b>5</b>	91,57	<b>1</b>	7,27	<b>2</b>

По подсчетам, экономический ущерб от солнечной электростанции составляет в 2025 году 4,81 млн. рос. рублей и возрастает в 2029 году до 6,14 млн. рос. рублей, что отражает умеренное воздействие на сельскохозяйственные угодья, в то время как выгода от производства электроэнергии составляет 72,50 млн. рос. рублей.

Гидроэлектростанция имеет невысокий расчетный экономический ущерб в размере 0,13 – 0,16 млн. рос. рублей (2025-2029 гг.), выгоды от производства электроэнергии составляют 126,78 миллионов российских рублей, польза от электростанции весьма значительна, что подчеркивает ее экономическую целесообразность.



Биогазовые установки и установки на биомассе приносят невысокую прибыль (24,74 и 9,05 млн. рос. руб. соответственно), однако экономическая оценка ущерба установок на биомассе составляет от 1,46 до 1,87 млн. рос. руб. за 5 прогнозируемых лет, а на биогазе в разы ниже – 0,01 млн. рублей, что демонстрирует наименьший объем ущерба среди всех электростанций.

Расчеты прибыли, оставшейся после выплаты экономического ущерба (4) приведены в таблице 5, а также представлено прямое ранжирование электростанций по этому показателю, в том числе в соотношении к установленной мощности и к площади установки по убыванию в таблице 6.

Атомная электростанция возглавляет рейтинг с прибылью в 30 607, 75 млн. рос. рублей, что свидетельствует о высокой экономической эффективности ядерной энергетики, несмотря на значительные экологические риски и ущерб, связанный с изъятием земель.

Прибыль ТЭС варьируется с 2025 по 2029 годы от 2 108,96 до 2 111,91 млн. рос. рублей после осуществления выплат за экономические потери, связанные с приобретением сельскохозяйственных земель. Это говорит о том, что теплоэлектростанция остается важным игроком в энергетическом секторе, и ее рентабельность относительно высока, если учитывать экологические издержки.

Гидроэлектростанция занимает третье место с прибылью в 126,66 млн. рос. рублей, демонстрируя баланс между воздействием на окружающую среду и рентабельностью, несмотря на значительный экономический ущерб, вызванный потерей сельскохозяйственных земель. Биогазовые станции и станции, работающие на биомассе, имеют невысокую прибыль – 24,73 млн. рос. рублей и 7,58 млн. рос. рублей соответственно в 2025 году, но более выгодны с точки зрения экологической устойчивости, поскольку приносят относительно небольшие потери. Ветряные (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции имеют более низкую прибыль – 9,71 млн. рос. рублей и 67,69 млн. рос. рублей, соответственно, что можно объяснить их меньшей генерирующей мощностью и более высокими затратами на установку.

При анализе рейтинга по площади установки первое место занимает биогазовая станция, что подчеркивает ее высокую эффективность при использовании ограниченной площади и высокую экономическую эффективность. АЭС и ГЭС также демонстрируют высокие результаты, но требуют значительно большей площади установки, ограничивая их развитие в условиях дефицита земли. Относительно небольшая площадь, занимаемая ветроустановками и установками на биомассе, делает их эффективной альтернативой при низком уровне землепользования, что подтверждается исследованием Совета международных отношений «Источники энергии: сравнение» [44].

В рейтинге установленной мощности АЭС вновь находится на первом месте и демонстрирует возможность достижения конкурентоспособной производительности. Биогазовая электростанция и гидроэлектростанция имеют высокие показатели, что делает их предпочтительными альтернативами для увеличения гене-

рирующих мощностей, в то время как биомасса занимает более низкое положение, показывая ее меньшую привлекательность с точки зрения генерирующих мощностей.

#### 4 Выводы

По результатам данного исследования можно сделать ряд важных выводов для экономической оценки экологического ущерба, связанного со строительством и эксплуатацией энергетических объектов на землях сельскохозяйственного назначения в Республике Беларусь. Прежде всего, следует подчеркнуть, что выбор источников энергии должен основываться не только на экономической эффективности, но и на оценке их воздействия на окружающую среду. Неподходящее расположение электростанций может привести к значительной потере биоразнообразия, ухудшению качества почв и изменению гидрологических процессов, что, в свою очередь, негативно сказывается на устойчивости экосистем и качестве жизни местного населения.

Во-вторых, результаты исследования показывают, что экономические потери от использования сельскохозяйственных земель для строительства энергетических станций могут значительно превышать потенциальные выгоды от их эксплуатации. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к планированию энергетических проектов, учитывающего как экономические, так и экологические аспекты.

Сравнительный анализ показывает, что атомные электростанции имеют самую высокую рентабельность даже после учета экономических потерь, что подтверждает их высокую эффективность. Биогазовые электростанции также конкурентоспособны благодаря меньшей занимаемой площади и меньшему размеру станции.

Строительство гидроэлектростанций приносит значительную прибыль, имеет высокие показатели по всем трем критериям, однако стоит учитывать и другие экологические риски, наносимые строительством и эксплуатацией ГЭС.

В-третьих, следует отметить, что использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая, может снизить экологические риски, однако их воздействие на местные экосистемы также должно быть тщательно оценено.

#### Литература

1. Семененя, И. Н. Экологические последствия мировой энергетики: невозобновляемые источники энергии / И. Н. Семененя, В. А. Переверзев // Мед. журнал. – 2024. – № 3(89). – С. 27-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.51922/1818-426X.2024.3.27>
2. Yu, Mingyi Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms / IOP Conf. Ser.: Earth Environ/ 2021 Sci. 680 012002 DOI 10.1088/1755-1315/680/1/012002

3. Zakharov, S V Analysis of the impact of the energy industry on the environment / S V Zakharov, V P Lushpey, L R Abbasova and S Zhongkai // et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1070 012044 DOI 10.1088/1755-1315/1070/1/012044
4. Проценко, П. П. Оценка негативного влияния на окружающую среду альтернативных источников энергии / П. П. Проценко, Т. А. Николаева // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2021. – № 93. – С. 75-78. – DOI 10.22250/jasu.93.16.
5. Маслеева, О. В. Экологические проблемы возобновляемых источников энергии / О. В. Маслеева, А. Ю. Кечкин // Актуальные проблемы электроэнергетики : Сборник научно-технических статей XXXII региональной научно-технической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения проф. С.В. Хვაцова, Нижний Новгород, 23–25 декабря 2013 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2013. – С. 57-60.
6. Шестакова, В. В. Исследование влияния производства и эксплуатации ВИЭ на окружающую среду / В. В. Шестакова // Вести в электроэнергетике. – 2020. – № 5(109). – С. 64-70.
7. Соколов Ю.И. Проблемы и риски возобновляемых источников энергии. *Проблемы анализа риска*. 2021;18(4):28-47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-28-47>
8. Азиева Р. Х., Мунаева Х. А. ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ // ЕГИ. 2022. №1 (39 ). С. 14-18
9. Борисова, Ю. С. Сравнительный анализ влияния объектов традиционной и альтернативной энергетики на окружающую среду / Ю. С. Борисова, Н. С. Самарская // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 4. — С. 58–63. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-58-63>
10. Матюшенко А.Д., Зорина Т.Г. Сравнительная характеристика традиционных и возобновляемых источников энергии с точки зрения экономической эффективности и вызываемого ими экологического ущерба // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика. 2023. 2. СС. 92-99.
11. Дегтярев К.С. ВИЭ и побочные экологические эффекты // Сантехника, отопление, кондиционирование. № 5 (161). 2015. С. 90-94.
12. Al Mubarak F, Rezaee R, Wood DA. Economic, Societal, and Environmental Impacts of Available Energy Sources: A Review. *Eng.* 2024; 5(3):1232-1265. <https://doi.org/10.3390/eng5030067>
13. О закупочных ценах на продукцию растениеводства урожая 2004 года, реализуемую для государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 11 марта 2004 г. №56 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
14. О закупочных ценах на сельскохозяйственную продукцию урожая 2005 года, реализуемую для республиканских государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 июля 2005 г. №769 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
15. О закупочных ценах на сельскохозяйственную продукцию урожая 2006 года, реализуемую для республиканских государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29 марта 2006 г. № 427 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
16. Об утверждении закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию урожая 2007 года, реализуемую для республиканских государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 14 мая 2007 г. № 587 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).

17. Об утверждении закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию урожая 2008 года, реализуемую для республиканских государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25 апреля 2008 г. № 613 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
18. Об утверждении закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию урожая 2009 года, реализуемую для республиканских государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 6 июля 2009 г. № 900 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
19. Об утверждении закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию урожая 2010 года, реализуемую для государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 20 июля 2010 г. № 1082 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
20. Об утверждении закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию урожая 2011 года, реализуемую для государственных нужд: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 8 февраля 2011 г. № 156 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
21. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2012 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 3 апреля 2012 г. № 20 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
22. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2013 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 17 июня 2013 г. № 25 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
23. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2014 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 19 марта 2014 г. № 6 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
24. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2015 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 30 марта 2015 г. № 11 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
25. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2016 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 24 марта 2016 г. № 13 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
26. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2017 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 23 февраля 2017 г. № 16 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
27. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2018 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 27 марта 2018 г. №34 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).

28. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2019 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 13 марта 2019 г. № 18 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
29. Об установлении предельных максимальных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2020 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 11 марта 2020 № 12 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
30. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2021 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 2 марта 2021 г. № 17 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
31. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2022 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 21 марта 2022 г. №22// ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
32. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2023 года, закупаемую для государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 14 марта 2023 г. № 33: с изм. и доп. вступ. в силу с 20 августа 2023 г. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
33. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2022 года, закупаемую для республиканских государственных нужд: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 26 марта 2024 г. № 26 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 18.02.2025).
34. Национальный банк Республики Беларусь [Электронный ресурс] // URL: <https://nbrb.by>. (дата обращения: 18.02.2025).
35. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс] // URL: <https://www.belstat.gov.by>. (дата обращения: 18.02.2025).
36. РУП «Белорусская атомная электростанция» [Электронный ресурс] – URL: <https://www.belaes.by/ru/> (дата обращения 05.02.2025)
37. РУП «Минскэнерго» [Электронный ресурс] – URL: <https://web.minskenergo.by> (дата обращения 05.02.2025)
38. РУП «Витебскэнерго» [Электронный ресурс] – URL: <https://www.vitebsk.energo.by> (дата обращения 05.02.2025)
39. Мстиславский районный исполнительный комитет [Электронный ресурс] – URL: <http://mstislavl.gov.by/ru> (дата обращения 05.02.2025)
40. Гомельский городской исполнительный комитет [Электронный ресурс] – URL: <https://gomel.gov.by/ru/> (дата обращения 05.02.2025)
41. Администрация Заводского района города Минска [Электронный ресурс] – URL: <https://zav.minsk.gov.by/> (дата обращения 05.02.2025)
42. Зорина Т.Г. Экономическая эффективность традиционных и возобновляемых источников энергии в контексте устойчивого развития: сравнительный анализ/ Т.Г. Зорина, А.Д. Матюшенко // Вестник БГЭУ. –2023. – № 5. – С. 5-14.

43. Оценка уровня затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления в различных отраслях экономики Республики Беларусь (транспорт, промышленность, жилищный сектор, сфера услуг и др.): Отчет о НИР (промежуточ.)/ Институт энергетике НАН Беларуси; Руководитель А.А. Михалевич – Мн., 2024. – 45 с. – № ГР 20231119.
44. Sources of Energy Comparison [Electronic resource] // Council on Foreign Relations – URL: <https://education.cfr.org/learn/reading/sources-energy-comparison>. (accessed 28.02.2025)

## Reference

1. Semenenya, I. N. Ecological consequences of the world energy: non-renewable energy sources / I. N. Semenenya, V. A. Pereverzev // *Med. zhurnal.* – 2024. – № 3(89). – p. 27-41. <https://doi.org/10.51922/1818-426X.2024.3.27>
2. Yu, Mingyi Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms / IOP Conf. Ser.: Earth Environ/ 2021 Sci. 680 012002 DOI 10.1088/1755-1315/680/1/012002
3. Zakharov, S V Analysis of the impact of the energy industry on the environment / S V Zakharov, V P Lushpey, L R Abbasova and S Zhongkai // et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1070 012044 DOI 10.1088/1755-1315/1070/1/012044
4. Protsenko, P. P. Assessment of the negative environmental impact of alternative energy sources / P. P. Protsenko, T. A. Nikolaeva // *Bulletin of Amur State University. Series: Natural and economic sciences.* – 2021. – № 93. – p. 75-78. – DOI 10.22250/jasu.93.16.
5. Masleyeva, O. V. Ecological problems of renewable energy sources / O. V. Masleyeva, A. Yu. Kechkin // *Actual problems of electric power engineering : Collection of scientific and technical articles of XXXII regional scientific and technical conference dedicated to the 75th anniversary of Prof. S. V. Khvatov, Nizhny Novgorod, 23-25 December 2013.* – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. R.E. Alekseev, 2013. – p. 57-60.
6. Shestakova, V. V. Investigation of the impact of RES production and operation on the environment / V. V. Shestakova // *Vesti v elektroenergetiki.* – 2020. – № 5(109). – p. 64-70.
7. Sokolov Yu.I. Problems and risks of renewable energy sources. Problems of risk analysis. 2021;18(4):28-47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-28-47>
8. Azieva R. H., Munayeva H. A. Opportunities and prospects for the development of renewable energy sources // *EGI. 2022. №1 (39).* С. 14-18
9. Borisova, Yu. S. Comparative analysis of the impact of traditional and alternative energy facilities on the environment / Yu. S. Borisova, N. S. Samarskaya // *Safety of technogenic and natural systems.* – 2021. – № 4. – P. 58-63. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-58-63>
10. Matyushenko AD, Zoryna TG. Comparative characteristic of conventional and renewable energy sources in terms of economic efficiency and their environmental damage. *Journal of the Belarusian State University. Economics.* 2023;2:92–99. Russian. EDN: CXNJCC
11. Degtyarev K.S. RES and environmental side effects // *Plumbing, heating, air-conditioning.* No. 5 (161). 2015. P. 90-94 (In Russ.)
12. Al Mubarak F, Rezaee R, Wood DA. Economic, Societal, and Environmental Impacts of Available Energy Sources: A Review. *Eng.* 2024; 5(3):1232-1265. <https://doi.org/10.3390/eng5030067>
13. About purchase prices for crop products of 2004 harvest realised for state needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 11 March 2004 №. 56 // *ETALON : inform.-search system* (accessed 18.02.2025).

14. About purchase prices for agricultural products of 2005 harvest realised for the republican state needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 12 July 2005 № 769 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
15. About purchase prices for agricultural products of 2006 harvest realised for the republican state needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus № 427 of 29 March 2006 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
16. On Approval of the Purchase Prices for Agricultural Products of the 2007 Harvest Realised for the Republican State Needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus № 587 of 14 May 2007 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
17. On Approval of the Purchase Prices for Agricultural Products of the 2008 Harvest Realised for the Republican State Needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 25 April 2008 № 613 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
18. On Approval of the Purchase Prices for Agricultural Products of the 2009 Harvest Realised for the Republican State Needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus № 900 of 6 July 2009 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
19. On Approval of Purchase Prices for Agricultural Products of the 2010 Harvest Realised for State Needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 20 July 2010 №1082 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
20. On Approval of purchase prices for agricultural products of the 2011 harvest, sold for state needs: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 8 February 2011 № 156 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
21. On setting fixed prices for agricultural products (crop production) of 2012 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 3 April 2012 № 20 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
22. On setting the maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the harvest of 2013, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 17 June 2013 № 25 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
23. On setting maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2014 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 19 March 2014 № 6 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
24. On setting the maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2015 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 30 March 2015 № 11 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
25. On establishing maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2016 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 24 March 2016 № 13 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
26. On establishing maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2017 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 23 February 2017 № 16 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
27. On setting maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2018 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 27 March 2018 №34 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).

28. On setting maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the 2019 harvest, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 13 March 2019 № 18 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
29. On setting the maximum marginal prices for agricultural products (crop production) of the harvest of 2020, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 11 March 2020 № 12 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
30. On setting fixed prices for agricultural products (crop production) of the harvest of 2021, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 2 March 2021 № 17 // ETALON : inform.-search system (accessed 18.02.2025).
31. On establishing fixed prices for agricultural products (crop production) for the harvest of 2022, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 21 March 2022 № 22// ETALON : inform.-search system (accessed 18.02.2025).
32. On setting fixed prices for agricultural products (crop production) for the harvest of 2023, purchased for state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 14 March 2023 № 33: with amendments and additions effective from 20 August 2023 // ETALON : information and search system (accessed 18.02.2025).
33. On the establishment of fixed prices for agricultural products (crop production) of the harvest of 2022, purchased for the republican state needs: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus of 26 March 2024 № 26 // ETALON : information retrieval system (accessed 18.02.2025).
34. National Bank of the Republic of Belarus [Electronic resource] // URL: <https://nbrb.by>. (accessed 18.02.2025).
35. National Statistical Committee of the Republic of Belarus [Electronic resource] // URL: <https://www.belstat.gov.by>. (accessed 18.02.2025).
36. RUE “Belarusian Nuclear Power Plant” [Electronic resource] – URL: <https://www.bel-aes.by/ru/> (accessed 05.02.2025)
37. RUE “Minskenergo” [Electronic resource] – URL: <https://web.minskenergo.by> (accessed 05.02.2025)
38. RUE “Vitebskenergo” [Electronic resource] – URL: <https://www.vitebsk.energo.by> (accessed 05.02.2025)
39. Mstislavl district executive committee [Electronic resource] – URL: <http://mstislavl.gov.by/ru> (accessed 05.02.2025)
40. Gomel City Executive Committee [Electronic resource] – URL: <https://gomel.gov.by/ru/> (accessed 05.02.2025)
41. Administration of Zavodskiy district of Minsk [Electronic resource] – URL: <https://zav.minsk.gov.by/> (accessed 05.02.2025)
42. Zorina, T.G. Economic efficiency of traditional and renewable energy sources in the context of sustainable development: a comparative analysis / T.G. Zorina, A.D. Matyushenko // Bulletin of BSEU. – 2023. – № 5. – p. 5–14.
43. Estimation of the cost level for the implementation of measures to increase electricity consumption in different sectors of the economy of the Republic of Belarus (transport, industry, housing, services, etc.): Report on Scientific and Research Work (interim)/Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus; Head A.A. Mikhalevich - Minsk, 2024. - 45 p. - № GR 20231119.
44. Sources of Energy Comparison [Electronic resource] // Council on Foreign Relations – URL: <https://education.cfr.org/learn/reading/sources-energy-comparison>. (accessed 28.02.2025)



## **Areas Where Different Types of Energy Sources are Located in The Republic of Belarus: Economic Assessment of Environmental Damage**

Angelina Matsiushenka

Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus

E-mail: [admatyushenko@gmail.com](mailto:admatyushenko@gmail.com)

**Annotation.** This article presents an economic assessment of agricultural resources in the context of construction and operation of various types of plants for generation of both renewable and non-renewable energy in agricultural areas of the Republic of Belarus. The indicators of profit from electricity generation with regard to economic damage have been estimated and a direct ranking based on various characteristics of power plants has been carried out. Such indicators as average fixed market value of grain, average grain yield, area required for construction of power plants, installed capacity, annual electricity generation and production cost of a power plant were taken into account.

**Keywords:** energy, power plants, agricultural land, crops, economic assessment, environmental damage.

УДК 620.92(575.3)

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128

EDN: WASMSE

## Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учетом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан

<sup>1,1</sup>Махсумов Илхом Бурхонович <sup>[0000-0001-7985-1315]</sup>,<sup>1,2</sup>Давлатзода Абуфазл Нусратулло <sup>[0009-0001-0976-8070]</sup>,<sup>2,3</sup>Холназаров Музаффар Бойназарович <sup>[0009-0003-3984-5107]</sup><sup>1</sup>Институт энергетики Таджикистана (ИЭТ), р-н. Кушониён, Таджикистан<sup>2</sup>Таджикский национальный университет, г. Душанбе, ТаджикистанE-mail: <sup>1</sup>messi.ilhom@gmail.com <sup>2</sup>davlatzoda\_88@mail.ru<sup>3</sup>m17.07.1989@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема недостаточного использования солнечного потенциала в южных районах Республики Таджикистан, где ограниченный доступ к централизованному энергоснабжению негативно сказывается на качестве жизни населения. Основная цель исследования заключается в анализе производительности автономных солнечных электростанций в данных удаленных регионах с учетом климатических факторов, параметров оборудования и экологических аспектов. Методология исследования основана на моделировании работы солнечных энергетических систем автономного типа с использованием программного пакета PVsyst, что позволяет учитывать ключевые параметры, такие как уровень солнечной радиации, угол наклона фотоэлектрических панелей, затенение, температурные колебания и влияние на окружающую среду. Оптимизация параметров фотоэлектрических модулей, аккумуляторных батарей и контроллеров выполнялась с учётом анализа суточного потребления электроэнергии, составляющего 10,48 кВт·ч, а также характеристик нагрузки. Средняя мощность нагрузки составляет около 437 Вт, а при максимальном одновременном потреблении электроэнергии суммарная мощность достигает 6573 Вт. В результате среднесуточное энергопотребление оценивается в 10,483 кВт·ч. Результаты моделирования показали, что при установленной мощности системы 13,68 кВт коэффициент покрытия энергетиче-

ских потребностей достигает 100%, а коэффициент полезного действия системы составляет 13,57%. Графические и табличные данные демонстрируют помесечное распределение генерации и потерь энергии, обусловленных климатическими особенностями региона и техническими характеристиками системы. Выводы исследования подчеркивают важность выбора качественного оборудования и оптимизации проектных параметров для повышения эффективности автономных солнечных электростанций. Кроме того, учитывая экологические преимущества солнечной энергетики, результаты могут служить основой для разработки рекомендаций по проектированию и внедрению устойчивых энергетических решений в южных регионах Таджикистана, что будет способствовать не только улучшению энергоснабжения, но и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** автономные солнечные электростанции, эффективность, программный пакет PVsyst, южные регионы Таджикистана, анализ производительности, экологические аспекты.

## 1 Введение

Солнечная энергетика в Таджикистане представляет собой значительный потенциал, который до сих пор используется в ограниченных масштабах. С учетом географического положения в так называемом "солнечном поясе" (среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет от 2100 до 3166 часов), страна обладает благоприятными условиями для развития солнечной энергетики. Однако, в настоящее время солнечные и ветровые источники составляют менее 1% общего энергобаланса, в то время как основная доля приходится на гидроэнергетику, которая обеспечивает около 90% выработки электроэнергии в стране, но лишь около 60% от конечного потребления энергии [1, 2].

В последние годы государство пытается развивать альтернативные источники энергии, в частности солнечные установки. В 2023 году при поддержке USAID была введена в эксплуатацию солнечная электростанция мощностью 600 кВт в районе Мургаб. Также планируется строительство солнечной электростанции мощностью 200 МВт в Согдийской области в сотрудничестве с британской и итальянской компаниями. Эти проекты являются частью более широкой стратегии по увеличению производственных мощностей возобновляемой энергии до 1000 МВт к 2030 году, что предусмотрено стратегией "Зеленой экономики" страны [1, 2]. Тем не менее, по мнению экспертов, одним из основных препятствий для развития солнечной энергетики в Таджикистане являются недостаточные инвестиции, сложная бюрократия, монополия на энергетическом рынке и низкие тарифы. Из-за этого энергетический сектор не привлекает достаточного интереса от частных и международных инвесторов. Также необходима поддержка государства для стимулирования локальных инициатив в установке и использовании солнечных панелей в отдаленных регионах, где доступ к электроэнергии ограничен. Таким образом, солнечная энергетика в Таджикистане имеет высокие перспективы,

но для ее успешного развития необходимо улучшение инвестиционного климата, упрощение бюрократических процедур и предоставление субсидий на установку солнечных панелей [1, 3].

Исследование производительности автономных солнечных электростанций с использованием программного пакета PVsyst особенно актуально для регионов с высоким уровнем солнечной радиации, таких как южные районы Таджикистана. В условиях обширного солнечного потенциала эти системы могут играть ключевую роль в обеспечении надежного и экологически чистого энергоснабжения, особенно в удалённых районах, где доступ к централизованной электросети ограничен. В проектах автономных солнечных систем, как правило, учитываются такие факторы, как оптимальный угол наклона панелей, что влияет на эффективность поглощения солнечной энергии, а также выбор подходящих аккумуляторов для обеспечения необходимого уровня автономности (обычно на 3-5 дней). PVsyst позволяет моделировать поведение системы с учетом сезонных изменений солнечной радиации и других климатических условий, что дает точное представление об ожидаемой годовой выработке энергии и потерь системы, связанных с модулями, кабелями и инверторами.

С помощью PVsyst исследователи могут оценить ключевые параметры, такие как производительность системы (Performance Ratio) и коэффициент использования (Solar Fraction), которые помогают определить эффективность системы. Например, исследования показали, что для автономных систем в солнечных регионах возможно достичь коэффициента использования до 97%, что указывает на высокую надежность системы в обеспечении заданного энергопотребления [4-6].

Целью данной статьи является оценка производительности автономных солнечных электростанций в южных районах Таджикистана с помощью программного пакета PVsyst. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: проанализировать влияние местных климатических условий на работу электростанций, определить ключевые параметры эффективности солнечных систем и разработать рекомендации по оптимизации их работы для максимальной производительности.

## 2 Теоретические основы

Автономные солнечные электростанции функционируют на принципах преобразования солнечной энергии в электрическую. Солнечные модули, основанные на фотогальванических эффектах, улавливают солнечную радиацию и преобразуют её в постоянный ток. Инверторы играют ключевую роль в преобразовании постоянного тока в переменный, необходимый для питания бытовых и промышленных устройств. Аккумуляторы обеспечивают хранение избытка энергии, что позволяет использовать её в ночное время или в условиях недостаточной солнечной радиации. Контроллеры заряда регулируют процесс зарядки аккумуляторов, предотвращая их перезаряд и избыточный разряд, что способствует увеличению

срока службы системы. Эти компоненты обеспечивают автономное и устойчивое энергоснабжение.

PVsyst это программное обеспечение для проектирования и анализа солнечных энергетических систем, предназначенное как для профессионалов, так и для исследователей. Оно включает в себя функционал для моделирования фотоэлектрических систем, позволяя пользователям учитывать климатические данные, географические параметры и характеристики компонентов. PVsyst предоставляет возможность анализировать производительность систем, рассчитывать потери и оптимизировать проектные решения. Программное обеспечение также включает инструменты для экономического анализа, что позволяет оценивать рентабельность проектов. Интуитивно понятный интерфейс и обширные библиотеки оборудования делают PVsyst незаменимым инструментом в области солнечной энергетики [7].

Критерии оценки производительности солнечных электростанций охватывают несколько ключевых аспектов, которые позволяют оценить их эффективность и надежность.

Коэффициент полезного действия (КПД) представляет собой отношение выработанной электроэнергии к доступной солнечной энергии и указывает на эффективность преобразования солнечной радиации в электрическую. Производственный коэффициент (Performance Ratio, PR) оценивает фактическую производительность системы относительно теоретически возможной, принимая во внимание потери, вызванные погодными условиями, тенью, температурой и другими факторами. Энергоэффективность систем измеряется количеством выработанной энергии за определенный период и может варьироваться в зависимости от местоположения и условий эксплуатации. Срок службы компонентов учитывает надежность и долговечность используемого оборудования, что критично для устойчивого функционирования электростанции [8-10].

Эти критерии позволяют не только оценить эффективность и экономическую целесообразность солнечных установок, но и служат основой для их дальнейшего улучшения и оптимизации.

## 2.1 Экологические аспекты солнечной электростанции

Солнечная энергетика является одной из самых экологически чистых технологий производства электроэнергии, поскольку ее эксплуатация не сопровождается выбросами парниковых газов и других вредных веществ в атмосферу. В отличие от традиционных тепловых электростанций, работающих на угле, нефти или газе, фотоэлектрические системы позволяют значительно снизить углеродный след. Например, солнечная электростанция мощностью 1 МВт помогает избежать выбросов около 1000–1500 тонн CO<sub>2</sub> в год, что играет важную роль в борьбе с изменением климата [11].

Одним из ключевых преимуществ солнечной энергетики является минимальное потребление воды. Традиционные электростанции, особенно угольные и

атомные, требуют значительного количества воды для охлаждения, тогда как солнечные панели практически не нуждаются в водных ресурсах во время эксплуатации. Это особенно важно для засушливых регионов, где нехватка воды является серьезной проблемой [12].

Однако, несмотря на очевидные экологические преимущества, производство солнечных панелей связано с определенным воздействием на окружающую среду. Добыча и переработка материалов, таких как кремний, серебро и алюминий, сопровождаются выбросами CO<sub>2</sub>. Тем не менее, срок службы солнечных модулей составляет 20–30 лет, что позволяет компенсировать первоначальные затраты на их производство. Более того, современные технологии переработки позволяют утилизировать до 90% компонентов панелей, включая стекло, металлы и полупроводниковые материалы, снижая нагрузку на окружающую среду.

Воздействие солнечных электростанций на экосистему зависит от места их установки. Наземные станции требуют значительных территорий, что может изменить ландшафт и повлиять на местную флору и фауну. Однако существуют альтернативные решения, такие как размещение панелей на крышах зданий, интеграция с сельским хозяйством или установка на водных поверхностях (плавающие солнечные станции). Эти подходы позволяют минимизировать негативное влияние на природные экосистемы и эффективно использовать доступное пространство.

Еще одним важным аспектом является низкий уровень шума и отсутствие значительных электромагнитных помех. В отличие от ветряных турбин, солнечные панели работают бесшумно, что делает их безопасными для людей и дикой природы [13].

Экологическая эффективность солнечной энергетики оценивается с помощью нескольких ключевых показателей. Коэффициент энергоокупаемости (Energy Payback Time, EPBT) показывает, за какой срок солнечная панель вырабатывает количество энергии, эквивалентное затраченному на ее производство. Для современных модулей этот показатель составляет от 1 до 4 лет, после чего они продолжают вырабатывать чистую энергию на протяжении десятилетий. Также используется коэффициент сокращения выбросов CO<sub>2</sub>, демонстрирующий, сколько тонн углекислого газа не попадает в атмосферу благодаря переходу на солнечную генерацию. Жизненный цикл солнечных панелей (Life Cycle Assessment, LCA) позволяет оценить их влияние на окружающую среду на всех этапах от добычи сырья до утилизации.

Таким образом, солнечные электростанции представляют собой один из самых перспективных вариантов устойчивого развития энергетики. Они позволяют снизить зависимость от ископаемого топлива, уменьшить выбросы CO<sub>2</sub> и минимизировать воздействие на окружающую среду, обеспечивая долгосрочную экономическую и экологическую выгоду [14].

### 3 Методология исследования

#### 3.1 Географическое положение

Объектом исследования для моделирования эффективности солнечной энергетической установки в удалённой местности выбран участок, расположенный в селе Бойтудашт на юге Таджикистана, в Пянджском районе Хатлонской области, с координатами  $37.24^\circ$  северной широты и  $69.09^\circ$  восточной долготы. Село Бойтудашт, являющееся частью сельской общины Кабут Саидфутдинова, находится на удалении 6 км от ближайшего поселкового центра и 11 км от центра района. Население села составляет около 580 человек, которые не имеют доступа к централизованному электроснабжению.

Отсутствие электроэнергии значительно ограничивает развитие инфраструктуры и снижает качество жизни, что создаёт острую необходимость в использовании альтернативных источников энергии для удовлетворения основных бытовых и социальных потребностей. Для получения метеорологических данных, необходимых для моделирования солнечной генерации, использовалась база данных Meteonorm 7.2 с параметром Sat = 100% - Synthetic, которая предоставляет климатологические данные с глобальным покрытием для применения в солнечной энергетике. Согласно этим данным, средняя годовая солнечная радиация в рассматриваемом регионе составляет от 5,5 до 8,6 кВт·ч/м<sup>2</sup>/день на высоте 2817 м над уровнем моря [15].

#### 3.2 Методология моделирования с использованием PVsyst

Методология моделирования с использованием программного обеспечения PVsyst начинается с определения базовых параметров системы, таких как ориентация и угол наклона солнечных панелей, а также характеристики местности, включая географические координаты и климатические данные. (рис. 1) Эти данные могут быть интегрированы с климатическими базами, например, Meteonorm, что позволяет учитывать факторы, влияющие на производительность системы, такие как солнечная радиация, температура и осадки. Далее задаются параметры потребления, где PVsyst предоставляет инструменты для оценки нагрузки и потребностей в электроэнергии. Это включает выбор используемых бытовых приборов и учет сезонных колебаний в потреблении. Результатом становится детализированный график нагрузки по месяцам и сезонам, что особенно важно для автономных солнечных систем [16-23].

Следующим этапом является выбор оборудования: аккумуляторных батарей, фотоэлектрических панелей, инверторов, контроллеров заряда и резервных генераторов. Все компоненты выбираются на основе расчетов потребности в энергии, чтобы обеспечить оптимальный баланс между генерацией и потреблением электроэнергии.

Для повышения точности моделирования PVsyst автоматически учитывает возможные потери мощности, такие как омические потери, потери от загрязнений, температурные колебания и снижение эффективности из-за угла наклона.

Также программа создает трехмерную модель затенений, чтобы учесть влияние теней на производительность системы. На финальном этапе проводится экономический анализ, включающий расчет стоимости установки и оценку потенциальной выгоды. Симуляция работы системы в реальном времени позволяет оценить её производительность в конкретных условиях эксплуатации. Итоговые результаты моделирования графики, таблицы и отчёты по производительности и эффективности системы конвертируются в формат PDF, что упрощает их использование для дальнейших исследований и принятия решений.

Такой подход обеспечивает комплексное проектирование солнечной установки, оптимизируя её работу и минимизируя потенциальные потери.

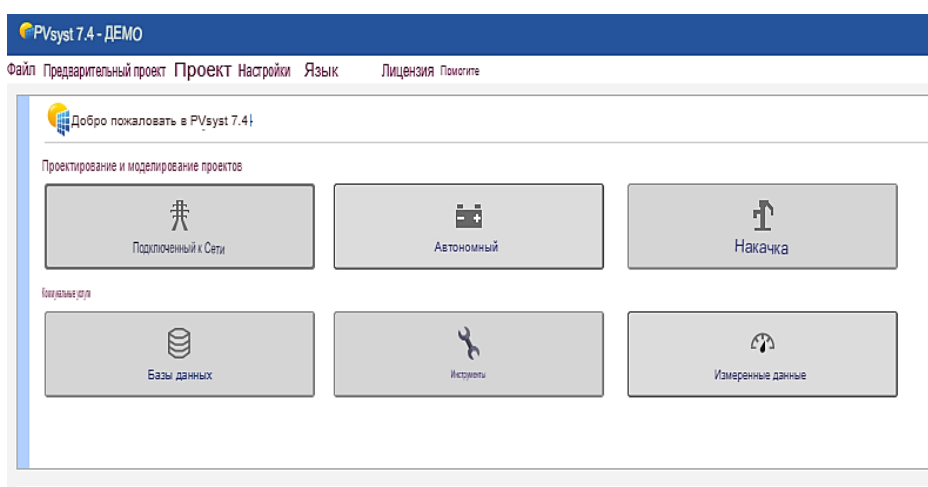


Рис. 1. Изображение рабочего интерфейса программного обеспечения PVsyst

### 3.3 Описание принципа работы программного обеспечения PVsyst

Принцип работы программы PVsyst можно описать следующим образом. На начальном этапе пользователь задаёт ориентацию и параметры установки солнечных панелей (угол наклона и азимут), которые способствуют максимальной генерации электроэнергии. Далее определяется потребность пользователя в электроэнергии, исходя из предполагаемого использования бытовых приборов, а также составляется график нагрузки с учётом сезонных колебаний. После этого выбираются тип, количество и технические характеристики аккумуляторных батарей, солнечных панелей, контроллера заряда и разряда, а также резервного генератора для автономной поддержки системы. В следующем разделе модель автоматически учитывает потенциальные потери, такие как тепловые, омические, потери от загрязнения и наклона, а также определяет горизонтальные затенения с учетом ориентации системы [23].



Далее создаётся 3D-модель затенений, которая помогает рассчитать коэффициенты затенения для всей системы. На завершающем этапе проводится экономическая оценка проекта и запускается процесс моделирования для анализа производительности системы в реальных условиях. Все результаты моделирования сохраняются в формате PDF для дальнейшего использования. Структурная схема моделирования представлена на рис. 2.

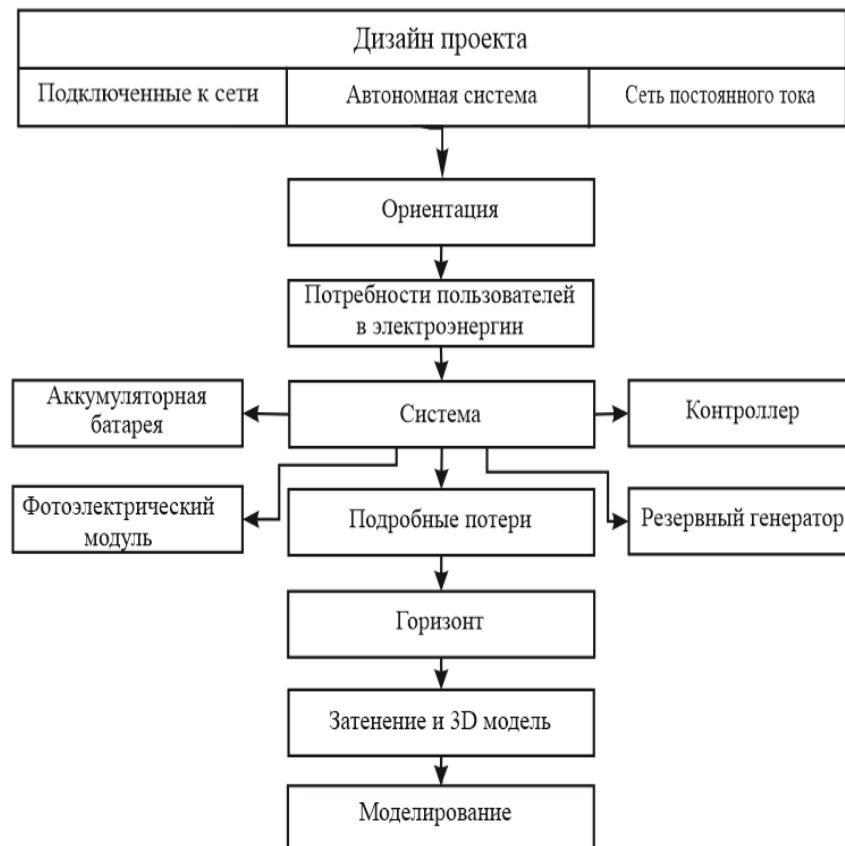


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая процесс моделирования в программном обеспечении PVsyst [23].

### 3.4 Определение размеров автономной фотоэлектрической системы в программном обеспечении PVsyst

Размер автономной фотоэлектрической системы (АФС) определяется с учетом требований пользователя, при этом разработчик должен указать желаемую номинальную мощность или площадь, доступную для размещения фотоэлектрических модулей. В PVsyst необходимо выбрать подходящий инвертор из базы данных

программы. Для корректной работы все строки, подключенные к фотоэлектрическим модулям, должны быть идентичны, включая тип модулей, количество модулей, соединённых последовательно, и их ориентацию. Принципиальная схема автономной фотоэлектрической системы, созданная в программном обеспечении Pvsyst, представлена на рисунке 3. Для защиты системы используется перепускной диод, который обеспечивает защиту от обратного тока.

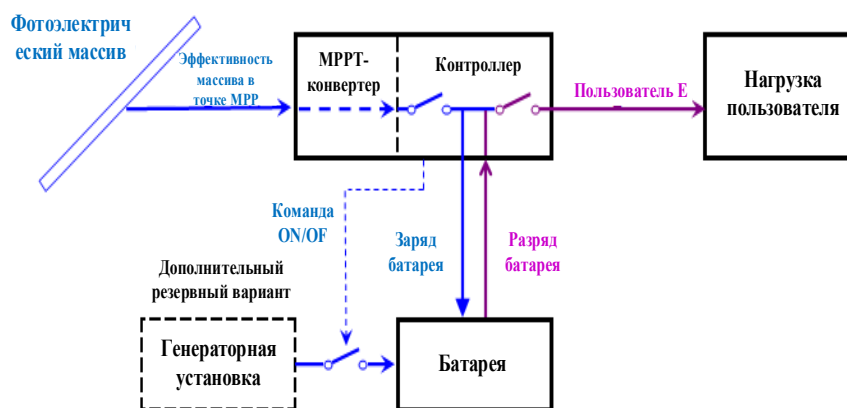


Рис. 3. Принципиальная схема автономной фотоэлектрической системы, созданная в программном обеспечении Pvsyst

### 3.5 Ориентация системы и определение нагрузки потребителей

На этапе ориентации необходимо настроить и задать оптимальный угол наклона для максимизации выработки электроэнергии автономной системой. В нашем случае солнечные панели направлены на юг, а угол наклона по отношению к земле определен заранее. Хотя потребление энергии зимой и летом существенно отличается, на этой широте солнечный ресурс остается почти неизменным в течение года. Поэтому угол наклона панелей подбирается с учетом летнего периода [24]. В данном случае наклон составляет  $45^\circ$ , а азимут равен  $0^\circ$ , что обеспечивает наибольшую эффективность генерации для этой местности.

Определение нагрузки электроприемников автономной фотоэлектрической системы включает расчет общей потребности в энергии, необходимой для стабильной работы системы без избыточной мощности и дополнительных затрат. Этот процесс охватывает анализ суточного и сезонного энергопотребления всех используемых приборов, таких как освещение, бытовая техника и климатические устройства, с учетом их мощности и режима работы. Точная оценка нагрузки позволяет оптимально спроектировать систему и повысить её эффективность.

Для моделирования автономной фотоэлектрической системы необходимо определить потребность в энергии, чтобы избежать избыточной мощности установки и лишних затрат [25]. Энергопотребление рассчитывается исходя из ежедневного использования электрических приборов и времени их работы.

В расчет включены следующие устройства: 10 светодиодных ламп, 2 телевизора, электрический чайник, холодильник, стиральная машина и мобильный кондиционер. В зимний период кондиционер заменяется на обогреватель. Такие приборы, как лампы и телевизоры, обычно работают с 8:00 до 13:00 и с 19:00 до 23:00 ежедневно. Остальные устройства включаются в течение дня, в среднем на 1-2 часа. Средняя мощность нагрузки составляет около 437 Вт, а пиковая мощность при одновременной работе большинства приборов достигает 6573 Вт. Таким образом, среднесуточное потребление энергии оценивается на уровне 10,483 кВт·ч/сутки, а график нагрузки представлен на рис. 4.

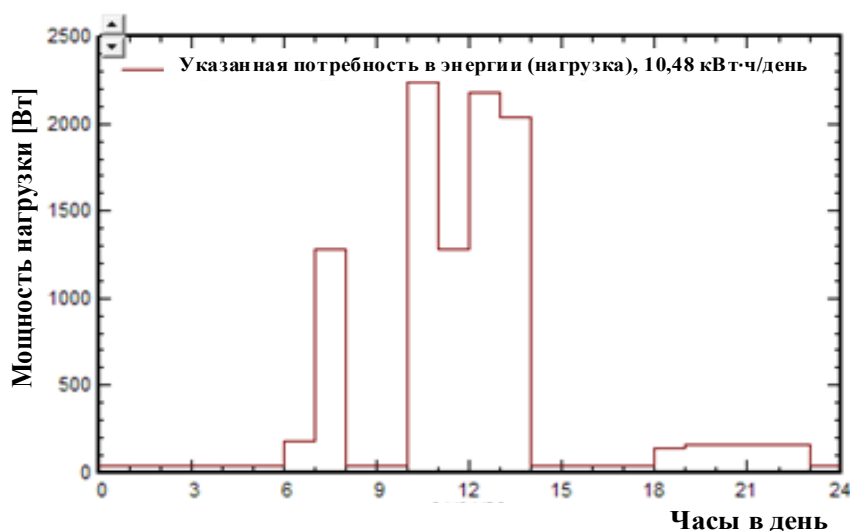


Рис. 4. График суточного распределения нагрузки потребителя

### 3.6 Подбор характеристик электрооборудования и конфигурирование системы

Определение параметров каждого компонента играет ключевую роль в конфигурации системы. Все элементы в данной работе подбирались с учетом требуемой энергетической мощности для покрытия нагрузки, а также с учетом климатических условий в месте установки. Таблица 1 содержит перечень оборудования, рекомендуемого для автономной фотоэлектрической системы (АФС). Правильно выполненный подбор и настройка параметров автономной фотоэлектрической системы обеспечивают её надежность, эффективность и экономичность, позволяя системе работать стабильно и адаптироваться к изменяющимся условиям потребления и окружающей среды.

**Таблица 1.** Электрооборудование, применяемое в автономной фотоэлектрической системе (АФС)

№	Наименование оборудования	Модель	Кол-во, шт.
1	Фотоэлектрический модуль с поликристаллическим кремнием (производитель Generetic)	Generetic, Poly 285 Wp 72 ячейек	48
2	Блок аккумуляторной батареи, тип универсальный	Регулируемый литий-ионный Universal (Li-ion)	19
3	Универсальный контроллер (производитель Generetic)	Universal controller with DCDC converter	1
4	Резервная генераторная установка	Номинальная мощность 3,0 кВт, Эффективная мощность 1,5 кВт	1

### 3.7 Подбор и конфигурация фотоэлектрического модуля в программной среде PVsyst

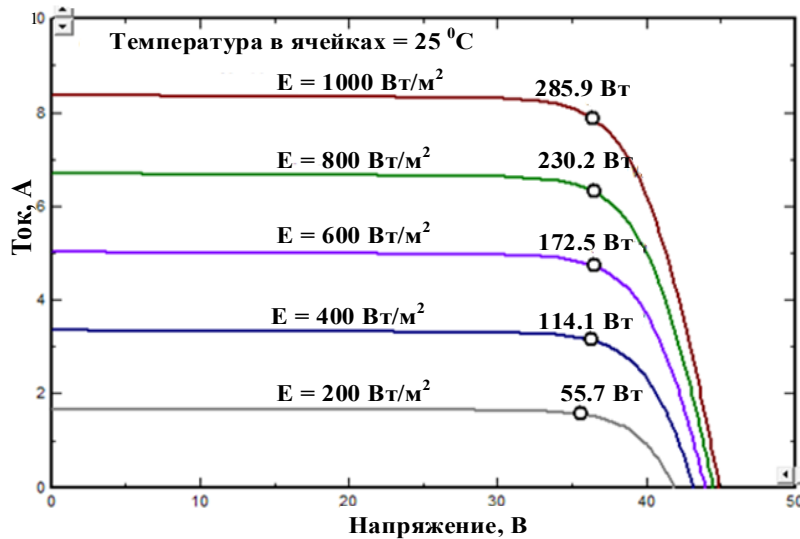
Размер фотоэлектрической матрицы определяется уровнем солнечного излучения и должен быть достаточным для удовлетворения потребностей в энергии как для нагрузки, так и для зарядки аккумуляторной батареи. Для достижения максимального захвата солнечной энергии фотоэлектрическую матрицу необходимо установить под определённым углом. В северном полушарии фиксированные солнечные массивы обычно ориентируются на юг, а оптимальная мощность массивов может быть достигнута при угле наклона, близком к географической широте местности; в данном исследовании этот угол составляет 45°.

Размер матрицы может быть адаптирован в зависимости от требуемой нагрузки. В текущем исследовании в качестве фотоэлектрического модуля была выбрана модель Generetic, Poly 285 Wp с 72 ячейками, в количестве 48 штук от производителя Generetic.

Вольт-амперные (I-V) и мощностные (P-V) характеристики фотоэлектрических модулей подвержены влиянию таких факторов, как освещённость, угол наклона и температура окружающей среды. Максимальная эффективность модулей достигается при стандартных тестовых условиях (STC: 1000 Вт/м<sup>2</sup>, 25 °C); однако в реальных эксплуатационных условиях температура воздуха может значительно колебаться, что зачастую приводит к снижению общей эффективности работы модулей. В условиях повышенной температуры использование фотоэлектрических модулей становится менее эффективным, так как в жарком климате наблюдается уменьшение выработки электроэнергии и сокращение срока службы оборудования. С целью решения данной проблемы несколько авторов [24, 26, 27] провели экспериментальные исследования с использованием голографической термозащиты, что позволило повысить энергетическую эффективность и защитить модули от перегрева. Экспериментальные результаты показали, что голографическая термозащита снижает температуру на поверхности фотоэлек-

трических модулей в среднем на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению с открытыми модулями. Аналогичные условия можно смоделировать с использованием программного обеспечения PVsyst, что позволяет строить вольт-амперные и мощностные характеристики в зависимости от изменения температуры, что является важным шагом в оптимизации работы фотоэлектрических систем.

На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и на рис. 6 мощностные характеристики при температуре окружающей среды  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  при одинаковом уровне освещенности. Как видно из графиков, ток короткого замыкания практически не изменяется в зависимости от температуры, в то время как напряжение холостого хода, которое определяет выходную мощность, существенно зависит от температурных условий. Таким образом, применение термозащиты для фотоэлектрического модуля может значительно повысить его эффективность и стабильность работы.



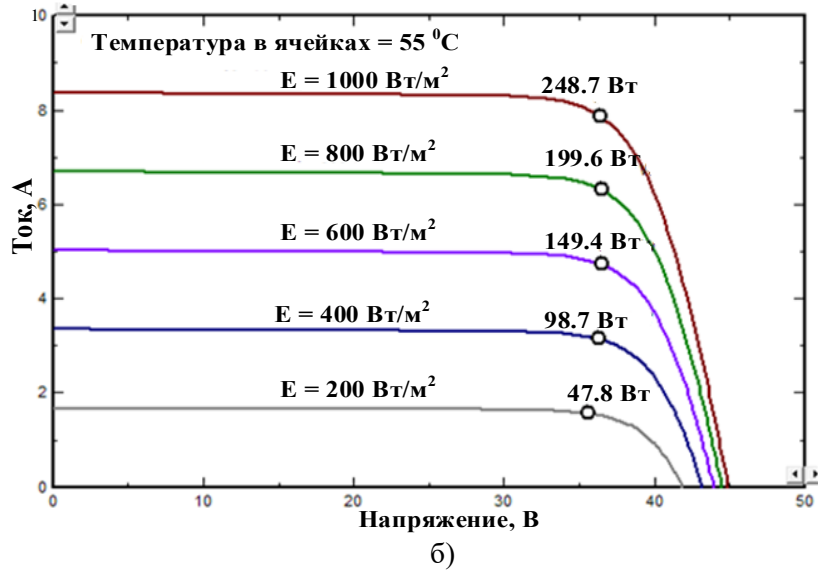
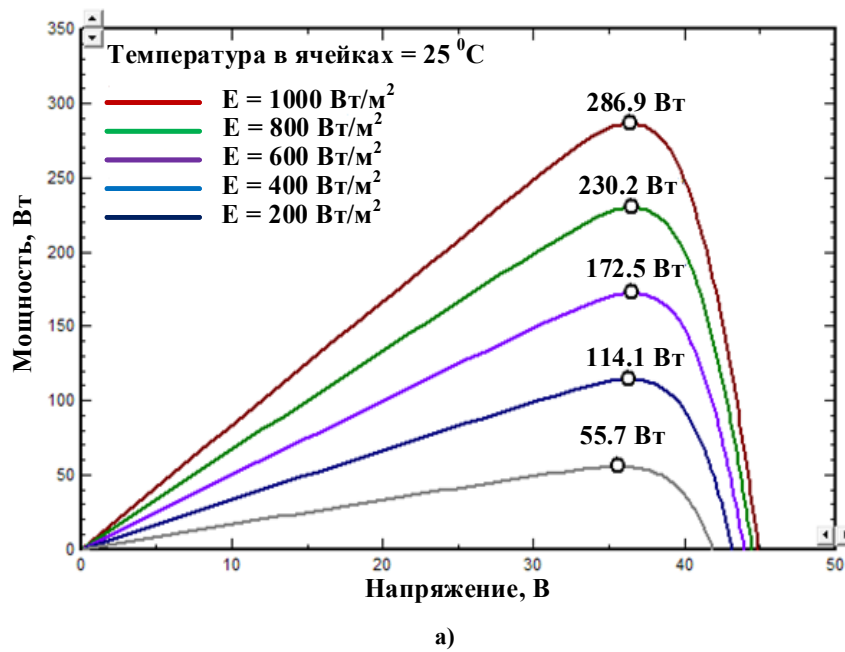
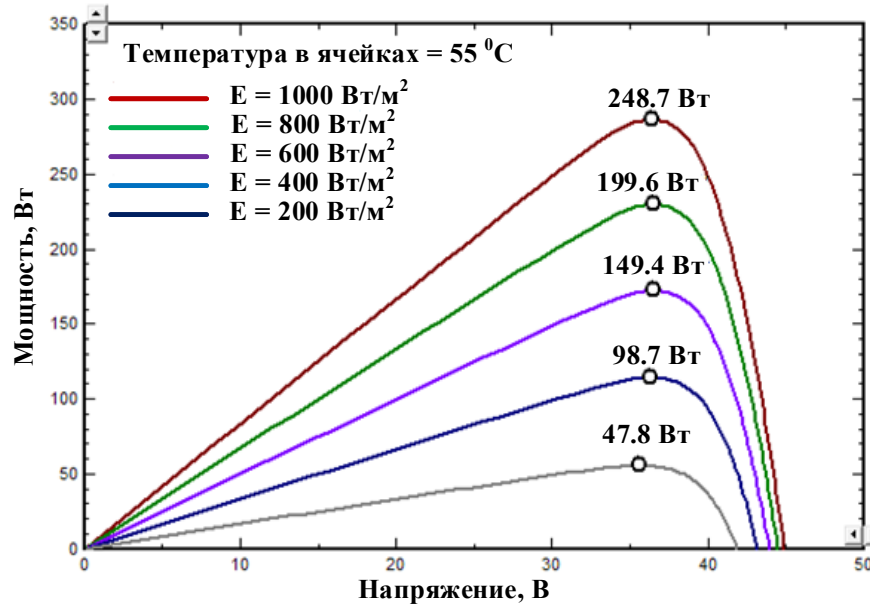


Рис. 5. Характеристики вольт-амперного поведения солнечного модуля при температурных режимах: а) 25 °C и б) 55 °C





б)

Рис. 6. Характеристики мощностного поведения солнечного модуля при температурных режимах: а) 25 °C и б) 55 °C

### 3.8 Подбор и конфигурирование многофункционального контроллера

Контроллер представляет собой ключевой компонент системы солнечной энергетики, выполняющий критически важную функцию защиты аккумуляторных батарей от перезаряда и глубокого разряда. Это способствует сохранению их ёмкостных характеристик и продлению срока эксплуатации. В случае снижения напряжения ниже допустимого уровня аккумулятор не сможет полностью зарядиться, а избыточное напряжение может привести к перегреву, что создает риск повреждения контактов и клемм аккумуляторных элементов [23].

Преобразователь МРРТ, ответственный за преобразование постоянного тока в переменный, не всегда достигает оптимальной эффективности. Максимальный коэффициент полезного действия (КПД), которого можно достичь в идеальных условиях, составляет 96%. В соответствии с рекомендациями программы PVsyst, учитывая параметры нагрузки и количество аккумуляторов, целесообразно применять универсальный контроллер с функцией DC-DC преобразования от компании Generetic.

#### 4 Результаты моделирования по производительности автономной фотоэлектрической системы

Результаты моделирования производительности солнечных электростанций, выполненного с использованием программы PVsyst, позволяют оценить ключевые показатели эффективности системы. В ходе моделирования анализируются годовые и месячные данные по генерации энергии, учитываются параметры солнечной радиации, затенения и температурные условия. Программа PVsyst предоставляет прогнозы выработки энергии и детализированную информацию о потерях, связанных с особенностями расположения и окружающими объектами. Эти данные позволяют оптимизировать проектирование и эксплуатацию солнечной электростанции, повышая её производительность и экономическую эффективность.

В ходе моделирования создаются графические и табличные материалы, в которых представлены месячные данные по ключевым параметрам, определяемым потребителем. В Таблице 2 содержатся сведения о суммарных метеорологических условиях и количестве солнечной энергии, поступающей на поверхность фотоэлектрической системы.

**Таблица 2.** Распределение солнечной инсоляции на поверхность солнечной модулей

Глобальное горизонтальное облучение (GlobHor)	Горизонтальное диффузное облучение (DiffHor)	Общая глобальная падающая энергия на плоскости ФЭС (GlobInc)
1715,1 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год	580,51 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год	1946 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год

##### 4.1 Определение горизонта и уровня затенения окружающей среды для фотоэлектрической станции

Для оценки эксплуатационных условий солнечной электростанции необходимо разработать трехмерную симуляцию, включающую дом, дерево и фотоэлектрические панели. Создание трехмерной модели требует наличия архитектурных чертежей для точного определения размеров, расположения и высоты массивов, а также окружающих объектов. В 3D модели (рис. 7) учтены характеристики горизонта, отражающие доступность солнечной радиации для фотоэлектрической системы. График горизонта учитывает все затеняющие объекты на местности, как дальние, так и близкие (на расстоянии менее 50 метров). Также представлено распределение затенения в период с 22 июня по 22 декабря, что позволяет анализировать изменения доступного солнечного света в зависимости от времени года.



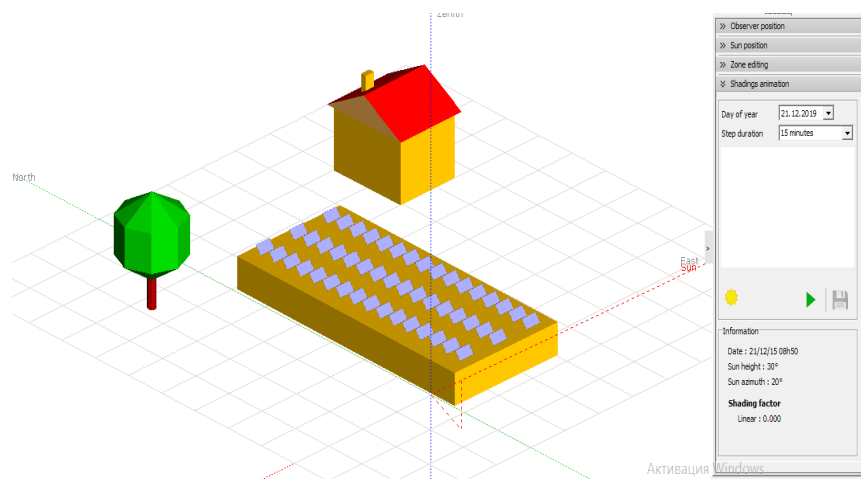


Рис. 7. Трехмерное моделирование теневых эффектов для солнечной системы

#### 4.2 Результаты анализа производительности солнечной системы

Коэффициент производительности солнечной системы, определённый с использованием программы PVsyst и характеризующий отношение фактической выходной мощности (на уровне инвертора) к расчётной мощности (на уровне фотоэлектрического массива), составил 13,57 %. Уровень покрытия потребности в энергии солнечной системой достигает 100%, что иллюстрирует эффективность её использования (рис. 8).

На рис. 9 представлена нормализованная структура генерации электроэнергии автономной системы, полученная в результате моделирования. Эта структура отражает основные потери и общее количество произведённой энергии. Максимальная суточная генерация системы составляет 13,68 кВт·ч. При полной зарядке аккумуляторных батарей избыточная энергия достигает 3,24 кВт·ч в сутки, тогда как энергия, передаваемая конечному потребителю, составляет 0,72 кВт·ч в сутки.

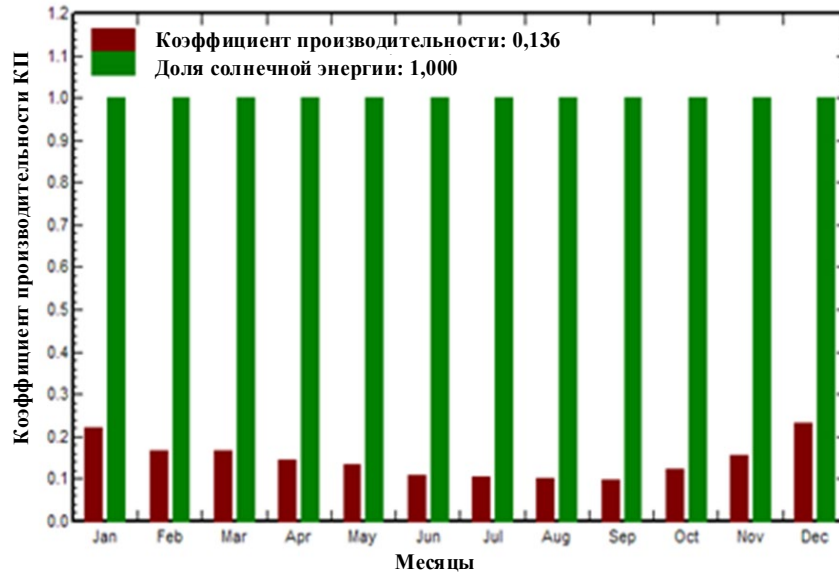


Рис. 8. Показатели производительности и доля солнечной энергии

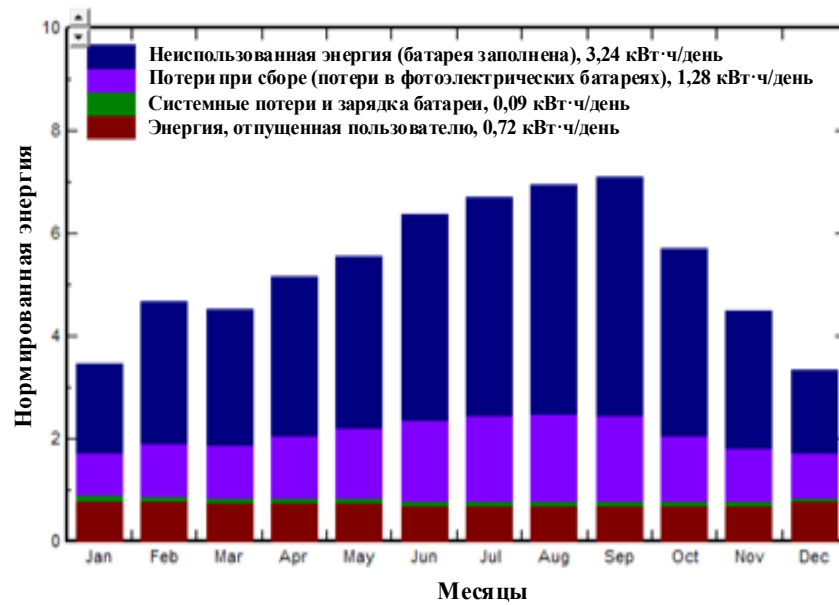


Рис. 9. Структура нормализованной генерации электроэнергии

#### 4.3 Годовая диаграмма потерь электроэнергии в автономной системе

Эффективное излучение, достигающее поверхности фотоэлектрического модуля и участвующее в выработке электроэнергии, составляет  $1756 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ . После преобразования энергии в PV модулях номинальная мощность при стандартных условиях испытаний (STC) достигает  $24180 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , а общий КПД фотоэлектрической станции при STC составляет  $14,8 \%$ . На этом этапе возникают следующие потери:  $4 \%$  связаны с повышенной температурой,  $0,75 \%$  с деградацией качества модулей,  $2,6 \%$  потери при подключении, и  $5,13 \%$  составляют омические потери. В результате, эффективная энергия, полученная на выходе солнечных модулей, составила  $4071 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . С учётом потерь на всех элементах системы, ежегодный объём энергии на выходе инвертора, доступный для потребителя, составил  $3612 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

## 5 Выводы

В данной работе проведена оценка производительности автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst, применяемого для одной из удалённых местностей Пянджского района Республики Таджикистан. В целях оптимизации функционирования автономной системы было осуществлено определение дневного и месячного потребления электроэнергии, а также выполнена настройка ориентации фотоэлектрических панелей для достижения максимальной эффективности. В дополнение, было выбрано и настроено необходимое электрооборудование для солнечной электростанции, а также резервный генератор, обеспечивающий поддержание автономной системы. Результаты моделирования показали, что наиболее высокий уровень солнечной радиации в районе Пяндж наблюдается в период с апреля по июль, с величинами, варьирующими от  $150,9$  до  $239,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ . При установке автономной системы мощностью  $13,68 \text{ кВт}$  в частном доме, обеспечивающей ежедневную нагрузку в  $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , было получено  $20 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$  доступной энергии в год при удельной выработке  $1463 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$ . Годовая потребляемая энергия составила  $3,6 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ , в то время как неиспользованная энергия достигла  $16,18 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ , а коэффициент полезного действия системы составил  $13,57 \%$ .

Значительная часть солнечной энергии, полученной в ходе анализа, не преобразуется в полезную энергию в результате потерь, связанных с передачей, контактными потерями, а также тепловыми потерями и другими факторами. Однако использование автономных фотоэлектрических систем не только способствует обеспечению надежного энергоснабжения в удаленных регионах, но и оказывает положительное влияние на окружающую среду. Применение программного обеспечения PVsyst позволяет выбрать высококачественное электрооборудование для солнечной электростанции, оценить её эффективность в условиях децентрализованного электроснабжения, а также минимизировать негативные экологические последствия за счет сокращения выбросов парниковых газов и снижения зависимости от традиционных источников энергии.

## Литература

1. Renewable Energy of Tajikistan. Why is it important for the country, but not a priority? [Электронный ресурс]. URL: <https://cabar.asia/en/renewable-energy-of-tajikistan-why-is-it-important-for-the-country-but-not-a-priority> (дата обращения 03.11.2024).
2. Can installing solar power systems in buildings help Tajikistan overcome the energy crisis? [Электронный ресурс]. URL: <https://old.asiaplustj.info/en/news/tajikistan/economic/20240710/can-installing-solar-power-systems-in-buildings-help-tajikistan-overcome-the-energy-crisis> (дата обращения 03.11.2024).
3. Tajikistan: Solar Energy in Support of Hydropower Plants: [Электронный ресурс]. URL: <https://cabar.asia/en/tajikistan-solar-energy-in-support-of-hydropower-plants> (дата обращения 03.11.2024).
4. Spea S. R., Khattab H. A. Design sizing and performance analysis of stand-alone PV system using PVSyst software for a location in Egypt // 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). – IEEE, 2019. – С. 927-932.
5. Kumar R. et al. Design and simulation of standalone solar PV system using PVSyst Software: A case study // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 46. – pp. 5322-5328.
6. Asia'u Talatu Belgore P., Rajak R., Patel P. Performance Evaluation of Stand-alone and On Grid Photovoltaic System using PVSYST Software // Performance Evaluation. – 2018. – V. 5. – №. 12.
7. PVSyst [Электронный ресурс]. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pvsyst.com/> (дата обращения 03.11.2024).
8. PV System Performance Assessment: [Электронный ресурс]. URL: <https://sunspec.org/wp-content/uploads/2015/06/SunSpec-PV-System-Performance-Assessment-v2.pdf> (дата обращения 03.11.2024).
9. Optimizing Solar Photovoltaic Performance for Longevity. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energy.gov/femp/optimizing-solar-photovoltaic-performance-longevity> (дата обращения 03.11.2024).
10. U.S. Energy & Employment Jobs Report. The U.S. Department of Energy (DOE): [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energy.gov/lm/doe-history> (дата обращения 03.11.2024).
11. Повышение мощности и КПД действующих солнечных электростанций при пониженном солнечном излучении: [Электронный ресурс]. URL: [https://apni.ru/article/353-povishenie-moshchnosti-i-kpd-dejstvuyushchikh?utm\\_source=chatgpt.com](https://apni.ru/article/353-povishenie-moshchnosti-i-kpd-dejstvuyushchikh?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 22.02.2025).
12. Плюсы и минусы использования солнечных электростанций: [Электронный ресурс]. URL: [https://tst-msk.ru/solnechnye-elektrostantsii-plyusy-i-minusy?utm\\_source=chatgpt.com](https://tst-msk.ru/solnechnye-elektrostantsii-plyusy-i-minusy?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 22.02.2025).
13. Unisolar. Воздействие солнечных панелей на окружающую среду: Роль солнечных панелей в уменьшении выбросов CO2 и улучшении экологической ситуации: [Электронный ресурс]. URL: <https://unisolar.energy/ru/blog-ru/vozdjstvie-solnechnyh-panelej-na-okruzhayushuyu-sredu-rol-solnechnyh-panelej-v-umenshenii-vybrosov-co2-i-uluchshenii-ekologicheskoy-situacii/> (дата обращения 22.02.2025).
14. Дашеев С.С. Экологические последствия развития солнечной энергетики / С.С. Дашеев, Е.А. Мальшев // Вестник науки и образования. – 2018. – №. 17-1 (53). – С. 53-55.

15. Бойтудашт. Википедия: [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/search/?text=%D0%91%D0%BE%D0%B9%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%B0%D1%88%D1%82&lr=10319> (дата обращения 03.11.2024).
16. Махсумов И.Б. Оценка эффективности использования солнечной энергетики на территории Хатлонской области Республики Таджикистан // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2024. – №. 1. – С. 62-74. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74
17. Махсумов И.Б. Оценка эффективности использования солнечной энергетики на территории Хатлонской области Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов // *Возобновляемая энергетика регионов России и сопредельных стран: Коллективная монография*. – Москва: Издательский дом КДУ, 2024. – С. 42-50.
18. Махсумов И.Б. и др. Методика расчета мощности солнечной системы автономного типа на примере электроснабжения частного дома // *Окружающая среда и энергоснабжение*. – 2024. – №. 2. – С. 79-97. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-2-79-97
19. Махсумов И.Б. Оценка потенциала солнечной энергии с использованием солнечных кадастров // *Энергетик*. – 2024. – №. 4. – С. 38-42. DOI: 10.34831/EP.2024.12.35.006
20. Махсумов И.Б. Двухосевая система слежения за солнцем для фотоэлектрических преобразователей / И. Б. Махсумов, И. С. Носиров, Ш. С. Саъдуллозода, Д. Ю. Гулов // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2022. – № 2(58). – С. 31-36.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613996 Российская Федерация. Имитационная модель фотоэлектрического преобразователя: № 2021613139: заявл. 16.03.2021: опубл. 17.03.2021 / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, А.С. Мартыанов, З.Ш. Абдулриджа; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет».
22. Патент на полезную модель № 201526 U1 Российская Федерация, МПК H01L 31/054. Голографическая пленка на основе призмаконов: № 2020132145: заявл. 30.09.2020: опубл. 21.12.2020 / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов, Е. А. Сироткин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».
23. Кирпичникова, И.М. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 77–88. DOI: 10.14529/power200207
24. Suresh P., Thomas J. Performance analysis of stand-alone PV systems under non-uniform operating conditions using PVsyst // *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*. – 2014. – V. 1. – №. 4. – P. 19-25.
25. Amutha W. M., Rajini V. Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 43. – P. 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.103>
26. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2019. – Т. 15. – №. 4. – С. 19-29.
27. Kirpichnikova I. et al. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019. – V. 140. – P. 11010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011010>

## References

1. Renewable Energy of Tajikistan. Why is it important for the country, but not a priority? [Electronic resource]. URL: <https://cabar.asia/en/renewable-energy-of-tajikistan-why-is-it-important-for-the-country-but-not-a-priority> (accessed on 03.11.2024).
2. Can installing solar power systems in buildings help Tajikistan overcome the energy crisis? [Electronic resource]. URL: <https://old.asiaplustj.info/en/news/tajikistan/economic/20240710/can-installing-solar-power-systems-in-buildings-help-tajikistan-overcome-the-energy-crisis> (accessed on 03.11.2024).
3. Tajikistan: Solar Energy in Support of Hydropower Plants: [Electronic resource]. URL: <https://cabar.asia/en/tajikistan-solar-energy-in-support-of-hydropower-plants> (accessed on 03.11.2024).
4. Spea S. R., Khattab H. A. Design sizing and performance analysis of stand-alone PV system using PVSyst software for a location in Egypt // 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). – IEEE, 2019. – C. 927-932.
5. Kumar R. et al. Design and simulation of standalone solar PV system using PVSyst Software: A case study // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 46. – pp. 5322-5328.
6. Asia`u Talatu Belgore P., Rajak R., Patel P. Performance Evaluation of Stand-alone and On Grid Photovoltaic System using PVSYST Software // Performance Evaluation. – 2018. – V. 5. – №. 12.
7. PVSyst [Электронный ресурс]. [Electronic resource]. URL: <https://www.pvsyst.com/> (accessed on 03.11.2024).
8. PV System Performance Assessment: [Electronic resource]. URL: <https://sunspec.org/wp-content/uploads/2015/06/SunSpec-PV-System-Performance-Assessment-v2.pdf> (accessed on 03.11.2024).
9. Optimizing Solar Photovoltaic Performance for Longevity. [Electronic resource]. URL: <https://www.energy.gov/femp/optimizing-solar-photovoltaic-performance-longevity> (accessed on 03.11.2024).
10. U.S. Energy & Employment Jobs Report. The U.S. Department of Energy (DOE): [Electronic resource]. URL: <https://www.energy.gov/lm/doe-history> (accessed on 03.11.2024).
11. Increasing the power and efficiency of existing solar power plants under reduced solar radiation: [Electronic resource]. URL: [https://apni.ru/article/353-povishenie-moshchnosti-i-kpd-dejstvuyushchikh?utm\\_source=chatgpt.com](https://apni.ru/article/353-povishenie-moshchnosti-i-kpd-dejstvuyushchikh?utm_source=chatgpt.com) (accessed on 22.02.2025).
12. Pros and cons of using solar power plants: [Electronic resource]. URL: [https://tst-msk.ru/solnechnye-elektrostantsii-plyusy-i-minusy?utm\\_source=chatgpt.com](https://tst-msk.ru/solnechnye-elektrostantsii-plyusy-i-minusy?utm_source=chatgpt.com) (accessed on 22.02.2025).
13. Unisolar. The environmental impact of solar panels: The role of solar panels in reducing CO2 emissions and improving the environmental situation: [Electronic resource]. URL: <https://unisolar.energy/ru/blog-ru/vozdjeystvie-solnechnyh-panelej-na-okruzhayushuyu-sredu-rol-solnechnyh-panelej-v-umenshenii-vybrosov-co2-i-uluchshenii-ekologicheskoy-situacii/> (accessed on 22.02.2025).
14. Dasheev S.S., Malyshev E.A. Environmental impacts of solar energy development. Bulletin of Science and Education, 2018, no. 17-1(53), pp. 53–55. (in Russ.)
15. Boitudasht. Wikipedia: [Electronic resource]. URL: <https://yandex.ru/search/?text=%D0%91%D0%BE%D0%B9%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%B0%D1%88%D1%82&lr=10319> (accessed on 03.11.2024).

16. Makhsumov I.B. Assessment of the Effectiveness of Using Solar Energy in Khatlon Region of the Republic of Tajikistan. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 2024, no. 1, pp. 62–74. (in Russ.) DOI: 10.24412/2658-6703-2024-1-62-74
17. Makhsumov I.B. Assessment of the Effectiveness of Using Solar Energy in Khatlon Region of the Republic of Tajikistan. *Renewable energy of the regions of Russia and neighboring countries: Collective monograph*. - Moscow: Publishing house Book house "University", 2024. - P. 42-50.
18. Makhsumov I.B. et al. Methodology for Calculating the Power of an Autonomous Solar System Using the Example of Power Supply to a Private House. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 2024, no. 2, pp. 79–97. (in Russ.) DOI: 10.24412/2658-6703-2024-2-79-97
19. Makhsumov I.B. Assessment of solar energy potential using solar cadastres. *Power Engineer*, 2024, no. 4, pp. 38–42. (in Russ.) DOI: 10.34831/EP.2024.12.35.006
20. Makhsumov I.B. et al. Biaxial sun tracking system for photovoltaic converters. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*, 2022, no. 2(58), pp. 31–36. (in Russ.).
21. Certificate of State Registration of Computer Programme No. 2021613996 Russian Federation. Simulation model of photoelectric converter: № 2021613139: Declared. 16.03.2021: published 17.03.2021 / I.M. Kirpichnikova, I.B. Makhsumov, A.S. Martyanov, Z.S. Abdulridha; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education ‘South Ural State University’ (in Russ.).
22. Utility model patent No. 201526 U1 Russian Federation, MPK H01L 31/054. Holographic film based on prismacons: No. 2020132145: Declared. 30.09.2020: published 21.12.2020 / I. M. Kirpichnikova, I. B. Makhsumov, E. A. Sirotkin; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education ‘South Ural State University (National Research University)’ (in Russ.).
23. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Using PVsyst to Select Electrical Equipment for a Photovoltaic System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 77–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200207
24. Suresh P., Thomas J. Performance analysis of stand-alone PV systems under non-uniform operating conditions using PVsyst. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2014, V.1, no. 4, pp. 19–25.
25. Amutha W. M., Rajini V. Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, V. 43, pp. 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.103>
26. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of solar module surface temperature using holographic overheating protection. *Electrical engineering and information complexes and systems*, 2019, V. 15, no. 4, pp. 19–29.
27. Kirpichnikova I. et al. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019, V. 140, pp. 11010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011010>

## **Analysis of the Performance of Autonomous Solar Power Plants Taking into Account Environmental Aspects Using the Pvsyst Software Package in the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan**

<sup>1,2</sup> Ilkhom Makhsumov,  
<sup>1,2</sup> Abufazl Davlatzoda,  
<sup>1,3</sup> Muzaffar Kholnazarov

<sup>1</sup>Tajik Power Engineering Institute, Kushoniyon district, Tajikistan

<sup>2</sup>Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

E-mail: <sup>1</sup>messi.ilhom@gmail.com <sup>2</sup>davlatzoda.88@mail.ru  
<sup>3</sup>m17.07.1989@mail.ru

**Abstract.** The article considers the problem of insufficient use of solar potential in the southern regions of the Republic of Tajikistan, where limited access to centralised energy supply negatively affects the quality of life of the population. The main objective of the study is to analyse the performance of off-grid solar power plants in these remote regions, taking into account climatic factors, equipment parameters and environmental aspects. The research methodology is based on modelling the operation of off-grid solar energy systems using the Pvsyst software package, which allows taking into account key parameters such as solar radiation level, PV panel angle, shading, temperature fluctuations and environmental impact. Optimisation of PV modules, batteries and controllers parameters was performed considering the analysis of daily electricity consumption of 10.48 kW·h and load characteristics. The average load power is about 437 W, and the total power reaches 6573 W at the maximum simultaneous power consumption. As a result, the average daily power consumption is estimated to be 10.483 kWh. The simulation results showed that with an installed system capacity of 13.68 kW, the energy demand coverage ratio reaches 100% and the system efficiency is 13.57%. Graphical and tabular data show the monthly distribution of generation and energy losses due to the climatic peculiarities of the region and the technical characteristics of the system. The findings of the study highlight the importance of selecting quality equipment and optimising design parameters to improve the efficiency of off-grid solar power plants. In addition, given the environmental benefits of solar energy, the results can serve as a basis for the development of recommendations for the design and implementation of sustainable energy solutions in the southern regions of Tajikistan, which will contribute not only to improving energy supply, but also to reducing the negative impact on the environment.

**Keywords:** off-grid solar power plants, efficiency, Pvsyst software package, southern regions of Tajikistan, performance analysis, environmental aspects.



УДК 551.8.02; 551.89

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-129-143

EDN: WYQTYX

## Тенденция изменений температуры поверхности Мирового океана в текущем столетии

<sup>1,1</sup> Федоров Валерий Михайлович<sup>[0000-0003-2305-7408]</sup>,  
<sup>1,2</sup> Дегтярев Кирилл Станиславович<sup>[0000-0002-1738-6320]</sup>,  
<sup>2,3</sup> Соловьев Дмитрий Александрович<sup>[0000-0001-5591-3067]</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: <sup>1</sup>fedorov.msu@mail.ru, <sup>2</sup>kir1111@rambler.ru,  
<sup>3</sup>solovev@ocean.ru

**Аннотация.** Выполненный оценочный прогноз показывает увеличение температуры поверхности океана (ТПО) в течение текущего столетия. Для Мирового океана ожидается увеличение аномалии ТПО (относительно 2020 г.) на 0,625°C, для Северного полушария на 0,649°C, для Южного полушария на 0,620°C. Соответствующие абсолютные значения ТПО в 2100 году составят 1,068°C, 1,121°C и 1,036°C. Аномалия ТПО Мирового океана увеличится к 2100 году относительно 2020 года в 2,41 раза.

**Ключевые слова:** температура поверхности океана, солнечная радиация, инсоляционная контрастность, колебания климата.

### 1 Введение

Более 2/3 поверхности Земли занято Мировым океаном, обладающим большой теплоемкостью и являющимся основным поставщиком водяного пара (основного парникового газа) в атмосферу. Океан активно обменивается веществом (водяной пар – испарение, атмосферные осадки) и энергией (теплом) с атмосферой. Поэтому велика его роль в формировании и изменении климата Земли. Теплообмен океана с атмосферой во многом определяется температурой поверхности океана (ТПО), которая в свою очередь тесно связана с инсоляцией. «Как бы ни были разнообразны и, разнохарактерны периодические движения, возникающие в водах мирового океана, корни их кроются обычно в одном и том же: лучистой энергии Солнца [1, с. 7].

Ранее нами выполнены расчеты облучения Земли с высоким пространственным и временным разрешением [2, 3]. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-441) [4, 5] для верхней границы атмосферы (или поверхности Земли без учета атмосферы) в интервале от 10 тысяч лет до н.э. до 10 тысяч 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:

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

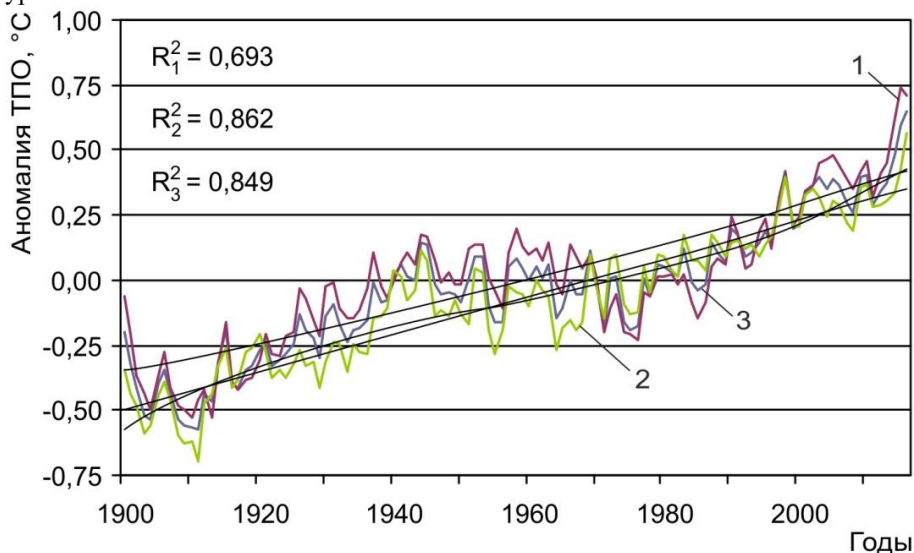
где  $I$  – приходящая солнечная радиация за элементарный  $n$ -й фрагмент  $m$ -го тропического года (Дж);  $\sigma$  – площадной множитель ( $\text{м}^2$ ), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал  $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$  – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида;  $\alpha$  – часовой угол,  $\varphi_1, \varphi_2$  – географические широты, выраженные в радианах;  $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$  – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $t$  – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе  $1^\circ$ , по широте  $1^\circ$ , по времени  $1/360$  часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Изменение активности Солнца в расчетах не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным  $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли солнечной энергии изложена в [3]. На основе полученных данных рассчитывалась характеристика меридионального переноса радиационного тепла – инсоляционная контрастность (ИК). Годовой перенос для полушарий рассчитывался как разность ИО в области  $00^\circ$ – $45^\circ$  (источника тепла) и области  $45^\circ$ – $90^\circ$  (стока тепла). Эта характеристика переноса радиационного тепла (названная ранее ИК – инсоляционная контрастность) обобщенно по областям источника и стока радиационного тепла отражает изменение меридионального градиента инсоляции [6, 7, 8]. Изменение температуры поверхности океана (ТПО) анализировалось в связи с динамикой годовой инсоляционной контрастности (ИК).

## 2 Анализ связи многолетних изменений ИК и ТПО

В качестве исходных температурных данных использовались значения аномалии ТПО (относительно 1961–1990 гг.) представленные в архиве HadSST3 Университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли [9]. Исследование связи данных ТПО и значений инсоляционной контрастности (ИК) проводилось на основе корреляционного анализа. Анализировались данные архива HadSST3 с 1900 г., считающиеся достоверными [10].

В исходных рядах [9] изменение ТПО Мирового океана и полушарий в основном учитываются трендами (рис. 1). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) показывает

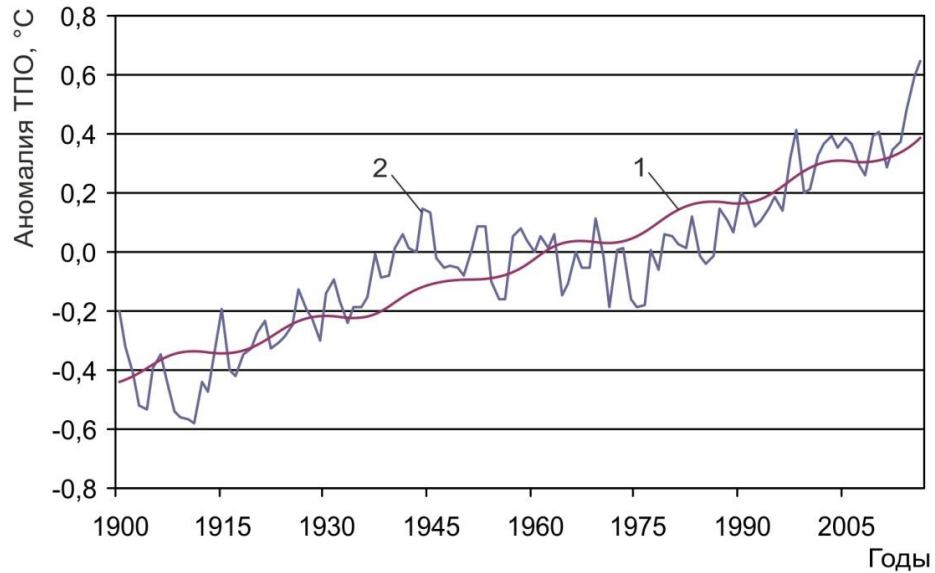
долю изменений ТПО, учитываемую трендом (полином второй степени). Таким образом, чтобы объяснить тенденции многолетних изменений ТПО следует определить фактор, определяющий тренды в исходных рядах глобальной температуры.



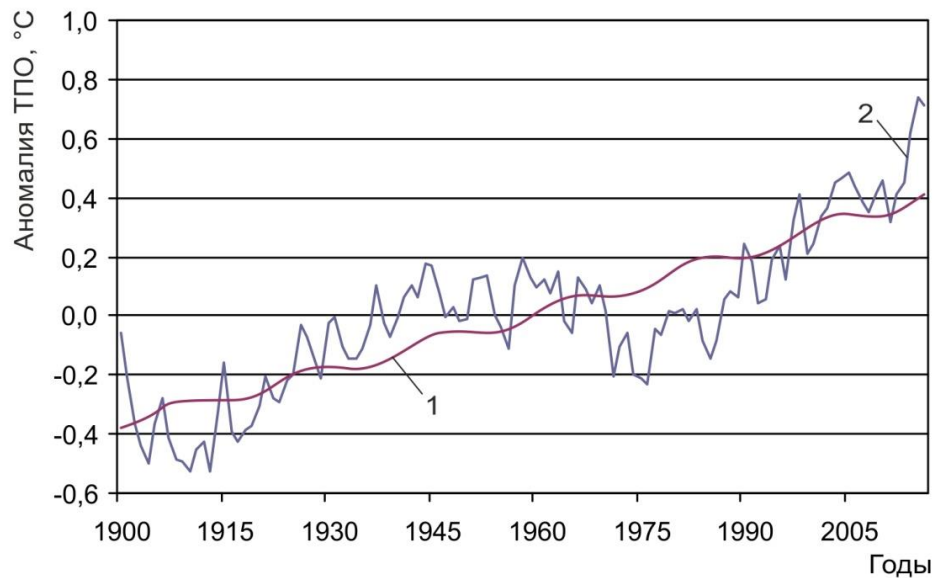
**Рис. 1.** Многолетние изменения аномалии ТПО Северного (1), Южного (2) полушария и Мирового океана (3).

Анализ показывает, что многолетние изменения аномалии глобальной ТПО характеризуются тесными положительными связями с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (ИК). Значения коэффициента корреляции ( $R$ ) в интервале с 1900 по 2016 гг. составляет 0,892 для Мирового океана, 0,830 для Северного полушария и 0,917 для Южного полушария. На основе тесной связи аномалии ТПО и годовой ИК были найдены уравнения линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии. Расчеты ТПО проводились по сглаженной (по 30-ти летнему скользящему среднему) годовой ИК.

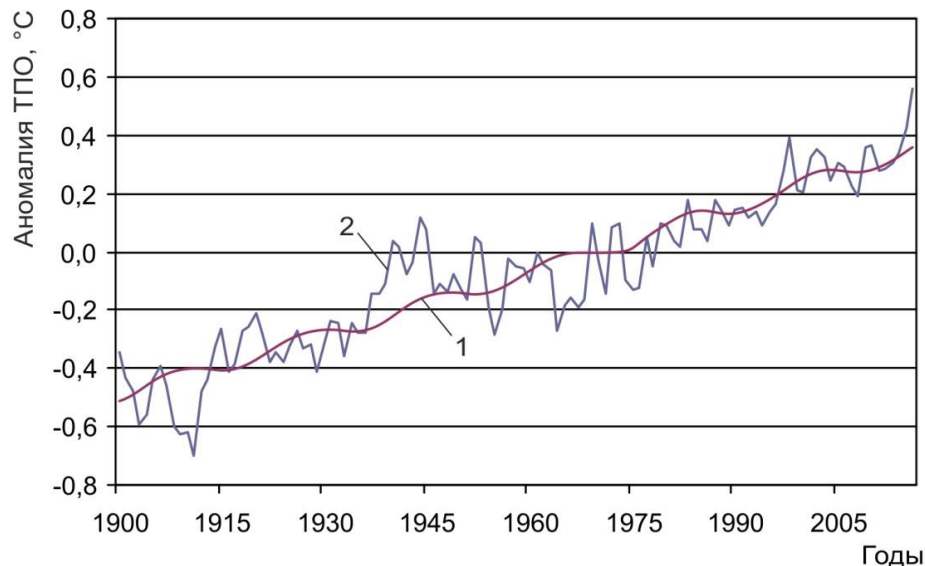
По уравнениям регрессии с использованием значений ИК были рассчитаны значения годовой аномалии ТПО на период с 1900 по 2016 гг. Далее рассчитывались средние значения аномалии ТПО по соответствующим линейным и полиномиальным решениям (ансамблевые значения). Сравнение фактических и рассчитанных по ансамблю значений аномалии ТПО проводилось на интервале с 1900 по 2016 гг. (рис. 2 – 4).



**Рис. 2.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Мирового океана



**Рис. 3.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Северного полушария

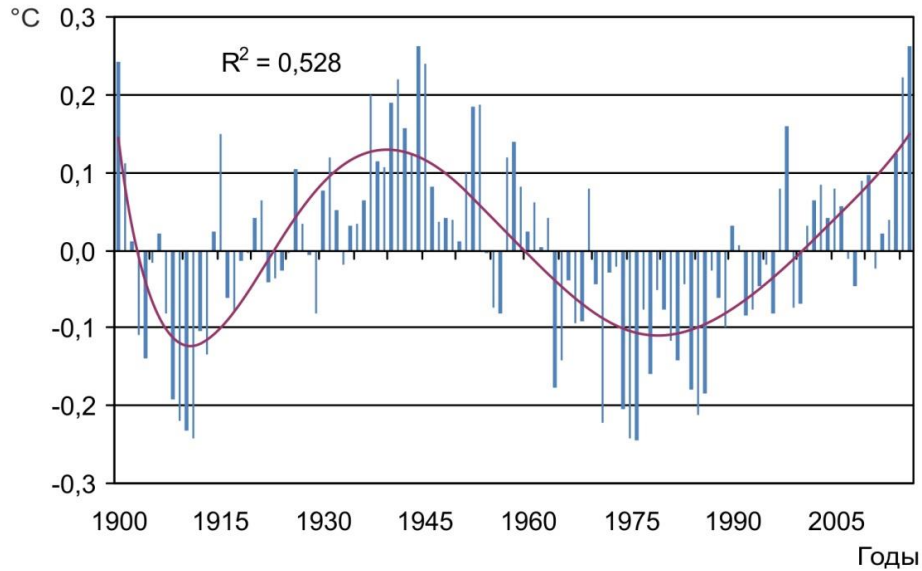


**Рис. 4.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Южного полушария

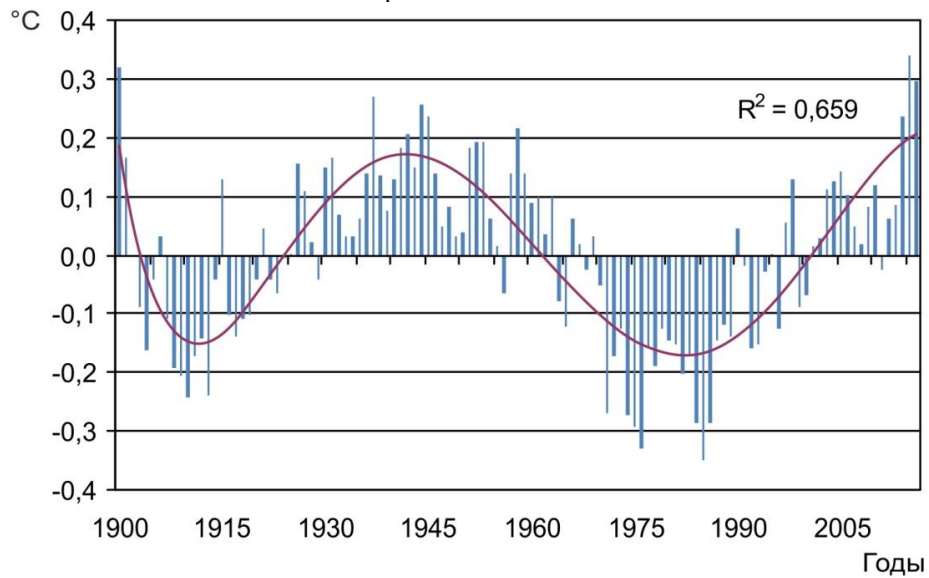
Рассчитанные ряды годовых аномалий ТПО характеризуются тесной корреляционной связью с фактическими значениями аномалии ТПО. Для Мирового океана  $R$  имеет значение 0,893, для Северного полушария 0,832, для Южного полушария 0,917. Среднее (по модулю) значение расхождения между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО составляют: для Мирового океана 0,094°C, для Северного полушария 0,123°C, для Южного полушария 0,081°C. Среднее по модулю значение фактической аномалии ТПО Мирового океана составляет 0,206°C, для Северного полушария 0,208°C, для Южного полушария 0,230°C. Полученные модули средних расхождений составляют 45,7% для Мирового океана, 59,4% для Северного полушария и 35,1% для Южного полушария от соответствующих средних (по модулю) значений фактической аномалии ТПО. Полученные расхождения, следовательно, значительно меньше естественной климатической изменчивости.

Рассчитывалась дисперсия значений аномалии ТПО в рядах фактических значений ( $D_1$ ) и в рядах разности фактических и рассчитанных (средних по ансамблю линейных и полиномиальных решений) значений аномалии ТПО ( $D_2$ ). Затем находилось отношение дисперсии в соответствующих рядах разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и дисперсии фактических значений ( $D_2/D_1$ ). Вычитанием из единицы полученных значений и затем умножением их на 100 были рассчитаны значения (в процентах) объясняемых регрессионной моделью изменений аномалии ТПО. Для Мирового океана регрессионной моделью или многолетними изменениями годовой ИК объясняется 79,7% аномалии ТПО, для Северного полушария 69,3%, для Южного полушария 84,1% [11].

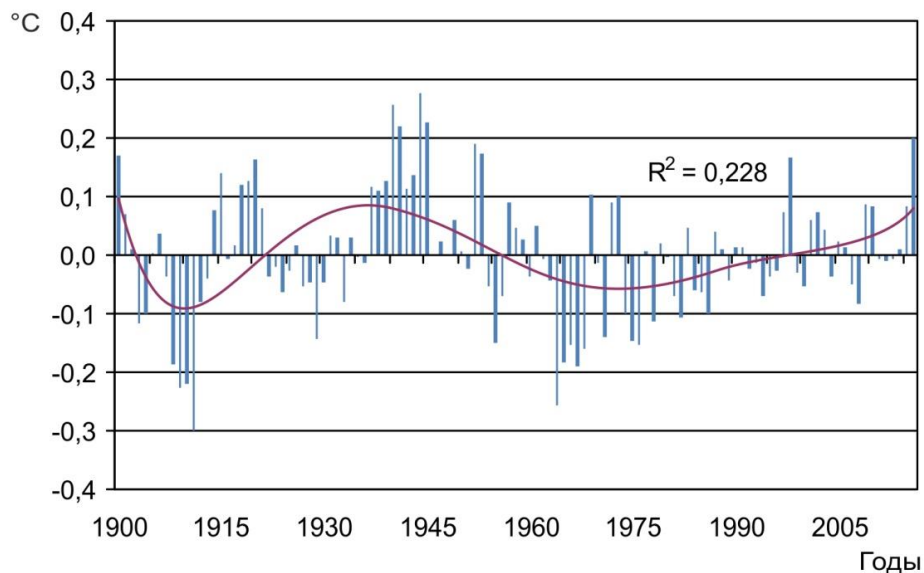
В распределение расхождений между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО, проявляется относительно регулярное колебание (рис. 5 – 7).



**Рис. 5.** Разность фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО Мирового океана



**Рис. 6.** Разность фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО Северного полушария



**Рис. 7.** Разность фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО Южного полушария

Представленные на рис. 5 – 7 значения расхождения показывают, что существуют группы фактических значений аномалии ТПО (продолжительностью на данном этапе в среднем 28,6 лет) расположенные либо выше рассчитанных значений аномалии, либо ниже. В этом колебании, при его очевидности, границы отдельных фаз, выражены нечетко. Так, переход от первой на этом интервале «теплой» фазы к «холодной» фазе приходится на 1902 – 1903 гг. Следующий переход от «холодной» к «теплой» фазе для Мирового океана отмечается в 1926 г., для Северного полушария в 1925 г. Однако, в Южном полушарии начало этой фазы наступает заметно позднее, в 1931 г. Следующий фазовый переход приходится на 1962 – 1964 гг. Эта фаза заканчивается синхронно в Северном и Южном полушарии. В целом, для ТПО в диапазоне с 1900 по 2016 гг. выделяется четыре фазы колебания в разности фактических и рассчитанных значений аномалии (табл. 1). В Южном полушарии (рис. 7) это колебание в расхождении фактических значений аномалии ТПО с рассчитанными значениями, выражено значительно слабее, чем в Северном полушарии (рис. 6). Отмеченное колебание с периодом около 60 лет в атмосфере и океане (AMO – Atlantic multidecadal oscillation) проявляется квазисинхронно [12].

Для определения характеристик колебания рассматривался вариант расположения его «теплых» и «холодных» фаз в представленных в табл. 1. временных диапазонах. В этом случае в среднем для Земли в каждой фазе 83,8% фактических значений аномалии ТПО находятся либо выше расчетных значений, либо ниже. Именно в зависимости от этого они условно определяются нами как «теплые» и «холодные» фазы соответственно.

В Северном полушарии однородность (по критерию выше или ниже расчетных) значений в группах в среднем составляет 87,9%. Хронологически эти группы (фазы), вероятно, в общем, синхронизируются с выделяемыми в типизации атмосферных процессов для Северного полушария циркуляционными эпохами [13]. Они также сходны с интервалами различных состояний современного климата, отражающими этапы многолетнего взаимодействия в системе океан – атмосфера [14].

**Таблица 1.** Характеристики отдельных фаз АМО в многолетних изменениях ТПО (СП – Северное полушарие, ЮП – Южное полушарие)

Холодная фаза					
	Средняя амплитуда	Годы	Холодные годы	Теплые годы	Всего лет
Океан	0,088	1903 – 1925	18 (78,3%)	5 (21,7%)	23
СП	0,107	1902 – 1924	20 (87,0%)	3 (13,0%)	23
ЮП	0,090	1903 – 1930	18 (64,3%)	10 (35,7%)	28
Теплая фаза					
Океан	0,093	1926 – 1963	6 (15,8%)	32 (84,2%)	38
СП	0,115	1925 – 1963	2 (5,1%)	37 (94,9%)	39
ЮП	0,089	1931 – 1961	8 (25,8%)	23 (74,2%)	31
Холодная фаза					
Океан	0,103	1964 – 1996	30 (90,9%)	3 (9,1%)	33
СП	0,147	1964 – 1996	28 (84,8%)	5 (15,2%)	33
ЮП	0,077	1962 – 1996	25 (71,4%)	10 (28,6%)	35
Теплая фаза					
Океан	0,084	1997 – 2016	5 (25,0%)	15 (75,0%)	20
СП	0,109	1997 – 2016	3 (15,0%)	17 (85,0%)	20
ЮП	0,060	1997 – 2016	8 (40,0%)	12 (60,0%)	20

Однородность групп в Южном полушарии в среднем составляет 67,5%. Средняя продолжительность фазы колебания в интервале от 1900 до 2016 гг. составляет 28,6 лет, а период – 57,2 года. Вероятно, определяемые эпохи соотносятся с «теплыми» и «холодными» фазами выделяемого в гидрометеорологических процессах колебания со средним периодом около 60-ти лет [15]. Таким образом, это около 60-летнее колебание проявляется повсеместно в изменении приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океана, изменении площади морских льдов в Северном Ледовитом океане [15].

Региональным проявлением этого колебания, вероятно, можно считать Североатлантическую осцилляцию (АМО). АМО – колебание в климатической системе Земли, отражающее периодическую изменчивость температуры поверхности океана в Северной Атлантике, была обнаружена в 1994 году М. Шлезингером и Н. Раманкути [16]. Эти колебания с периодом в среднем около 65 – 70 лет подтверждаются историческими наблюдениями и модельными расчетами [17, 18]. Однако, единства мнений относительно амплитуды и генезиса этого явления пока не существует. Оценкой Североатлантической осцилляции является индекс



АМО, представляющий собой аномалию температуры поверхности океана (ТПО) в этом районе относительно среднего значения за период с 1951 по 1980 гг. [19]. Отмечается корреляция температуры воздуха, атмосферных осадков и активности ураганов с индексом Североатлантической осцилляции на большей части Северного полушария, в особенности в Северной Америке, Северной Африке и в Европе [20, 21].

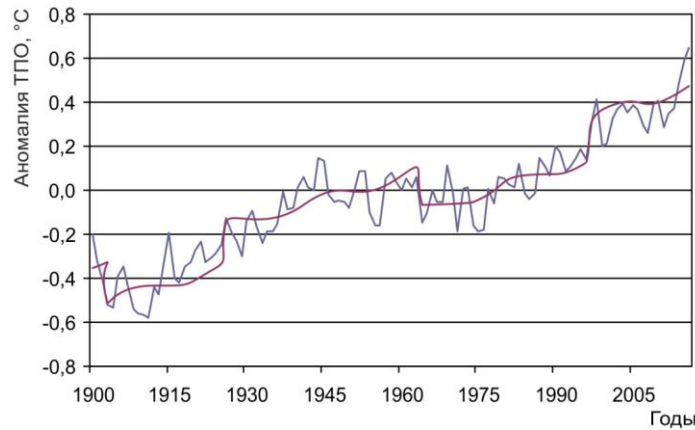
Модуль расхождения между фактическими и рассчитанными значениями аномалии ТПО принимался нами за амплитуду АМО. Средняя амплитуда АМО для Мирового океана составляет  $0,092^{\circ}\text{C}$ , в Северном полушарии она увеличивается до  $0,120^{\circ}\text{C}$ , в Южном полушарии сокращается до  $0,079^{\circ}\text{C}$ . В Северном полушарии, таким образом, АМО проявляется более заметно, чем в Южном полушарии. Средняя амплитуда АМО в Южном полушарии гораздо меньше (составляет 66,1% от средней амплитуды в Северном полушарии), чем в Северном. Более того, как видно из табл. 1. амплитуда АМО постепенно уменьшается. Возможно, это колебание в Южном полушарии затухает.

Средние значения расхождения для «теплых» и «холодных» фаз составляют (в принятых границах «теплых» и «холодных» фаз) для Мирового океана  $0,089^{\circ}\text{C}$  и  $-0,096$ , для Северного полушария  $0,112^{\circ}\text{C}$  и  $-0,127^{\circ}\text{C}$ , для Южного полушария  $0,075^{\circ}\text{C}$  и  $-0,084^{\circ}\text{C}$  соответственно. Так как отмеченное колебание в настоящее время является относительно регулярным, то можно приблизительно учесть связанные с ним неточности в моделировании аномалии ТПО.

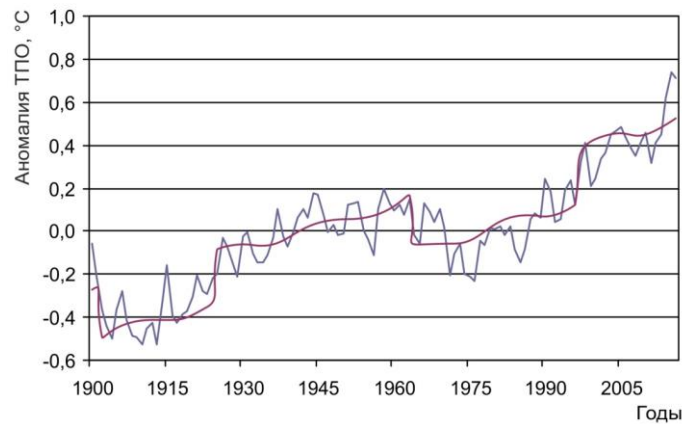
Значение  $R$  для рассчитанных значений аномалии ТПО, учитывающих поправку, с рядами фактических значений аномалии ТПО Мирового океана возрастает до 0,942 (0,893 – без учета поправки на АМО), для Северного полушария до 0,933 (0,832 – без учета поправки на АМО), для Южного полушария до 0,931 (0,917 – без учета поправки на АМО). Учет поправки проводился алгебраическим сложением разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО с рассчитанными значениями аномалии ТПО (или, что тоже самое, для холодных фаз вычитанием средних для фазы значений расхождения из рассчитанных значений, для теплых – сложением).

Рассчитывалась дисперсия значений аномалии ТПО в рядах фактических значений ( $D_1$ ) и в рядах разности фактических и рассчитанных (средних по ансамблю линейных и полиномиальных решений и учитывающих поправки на АМО) значений аномалии ТПО ( $D_2$ ). Затем находилось отношение дисперсии в соответствующих рядах разности фактических и рассчитанных значений аномалии ТПО и дисперсии фактических значений ( $D_2/D_1$ ). Вычитанием из единицы полученных значений и затем умножением их на 100 были рассчитаны значения (в процентах) объясняемых регрессионной моделью изменений аномалии ТПО. Поправки на АМО учитывались алгебраическим сложением средних значений для «теплых» и «холодных» фаз КМО с рассчитанными (по ансамблю) значениями аномалии ТПО. Для Мирового океана в этом случае регрессионная модель объясняет 88,5% дисперсии аномалии ТПО, в Северном полушарии 86,6%, в Южном полушарии 85,9%. Таким образом, АМО объясняется 8,8% изменений аномалии ТПО Мирового океана, 17,3% в Северном полушарии и 1,8% дисперсии аномалии ТПО в Южном полушарии (рис. 8 – 10). Из этого следует, что АМО

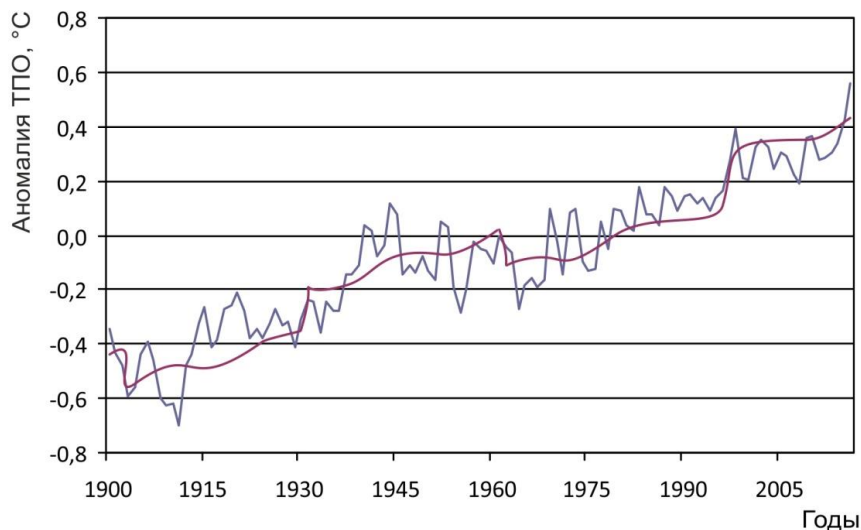
характерно для Северного полушария. В Южном полушарии оно проявляется гораздо слабее. Остающаяся без объяснения часть изменений аномалии ТПО (приблизительно 11,5% – 14,1%), вероятно, связана с изменением солнечной активности, вулканической деятельностью, изменением скорости вращения Земли, изменением состояния природной системы Земли и ее компонентов [7, 22] и другими факторами.



**Рис. 8.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Мирового океана с учетом АМО



**Рис. 9.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Северного полушария с учетом АМО



**Рис. 10.** Рассчитанные (1) и фактические (2) значения аномалии ТПО Южного полушария с учетом АМО

В период с 1900 по 2016 гг. уменьшение угла наклона оси вращения составило  $0,015^\circ$  (или  $0,063\%$  от среднего за это период значения). Увеличение годовой ИК составило за тот же период  $1,618 \text{ Дж/м}^2$  (или  $0,036\%$  от среднего за этот период значения). Увеличение аномалии ТПО за тот же период для Мирового океана определяется значением  $0,884^\circ\text{C}$ , для Северного полушария  $0,909^\circ\text{C}$ , для Южного полушария  $0,857^\circ\text{C}$ . Таким образом, увеличением годовой ИК, с учетом полученных значений дисперсии, определяется увеличение аномалии ТПО Мирового океана на  $0,705^\circ\text{C}$ , аномалии ТПО Северного полушария на  $0,630^\circ\text{C}$ , Южного полушария на  $0,721^\circ\text{C}$ . Двумя факторами: годовой ИК и КМО определяется повышение аномалии ТПО Мирового океана на  $0,783^\circ\text{C}$ , аномалии ТПО Северного полушария на  $0,787^\circ\text{C}$ , Южного полушария на  $0,736^\circ\text{C}$ .

На основе полученных уравнений регрессии также рассчитывались значения аномалии ТПО на период с 2017 по 2100 гг. Расчеты выполнялись для Мирового океана и полушарий (рис. 11).

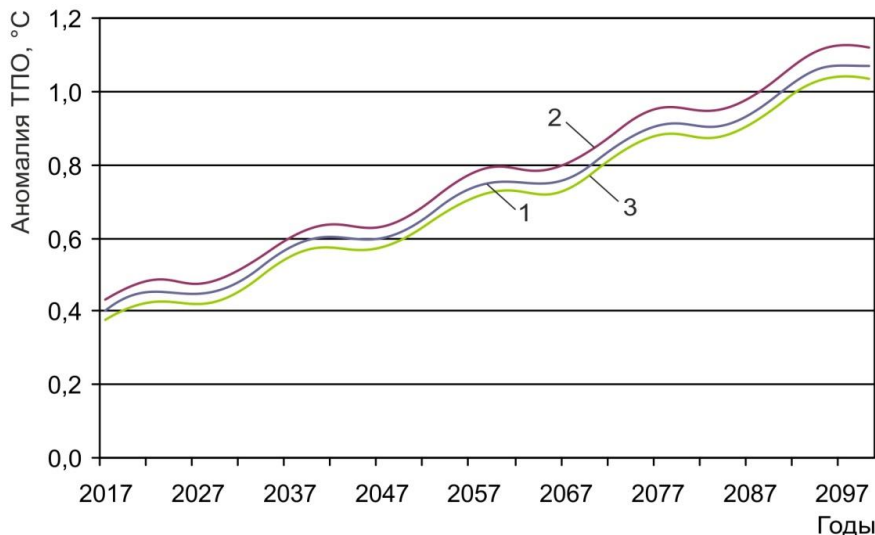


Рис. 11. Оценочный прогноз изменения аномалии ТПО Мирового океана (1), Северного полушария (2), Южного полушария (3) для текущего столетия.

## 5 Заключение

Выполненный оценочный прогноз показывает увеличение ТПО в течение текущего столетия. Для Мирового океана ожидается увеличение аномалии ТПО (относительно 2020 г.) на  $0,625^{\circ}\text{C}$ , для Северного полушария на  $0,649^{\circ}\text{C}$ , для Южного полушария на  $0,620^{\circ}\text{C}$ . Соответствующие абсолютные значения ТПО в 2100 году составят  $1,068^{\circ}\text{C}$ ,  $1,121^{\circ}\text{C}$  и  $1,036^{\circ}\text{C}$ . Аномалия ТПО Мирового океана увеличится к 2100 году относительно 2020 года в 2,41 раза. Аномалия ТПО в Северном полушарии увеличится в 2,53 раза, в южном полушарии в 2,49. При этом, в «холодные» фазы АМО фактическая аномалия ТПО Мирового океана в среднем, будет ниже расчетных значений аномалии на  $0,096^{\circ}\text{C}$ , в Северном полушарии на  $0,127^{\circ}\text{C}$ , в Южном полушарии на  $0,084^{\circ}\text{C}$ . В «теплые» фазы АМО фактическая аномалия ТПО будет превышать расчетные значения для Мирового океана на  $0,089^{\circ}\text{C}$ , для Северного полушария на  $0,116^{\circ}\text{C}$ , для Южного полушария на  $0,075^{\circ}\text{C}$ . Однако, даты начала этих фаз однозначно не определены. Вероятное начало очередной «холодной» фазы КМО может принадлежать текущему десятилетию.

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

---

## Литература

1. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: АН СССР, 1953. 990 с.
2. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution. *Solar System Research*, 2016, vol. 50, no. 3, pp. 220–224. DOI: 10.1134/S0038094616030011.
3. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999. *Springer Geology*, 2020, vol. I, pp. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6\_20.
4. Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США. URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) (дата обращения 28.03.2025).
5. Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., Kuchynka, P. The planetary time series. *Reviews of Geophysics*, 2014, no. 40, 3–1–3–41.
6. Fedorov V.M. Insolation Contrast and Trends in Modern Climate Change. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022, vol. 62, no. 7, pp. 932–937. DOI: 10.1134/S001679322207009X
7. Федоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // Геориск, 2020. Т. XIV, № 4. С. 16–29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29>
8. Федоров В.М. Проблемы параметризации радиационного блока физико-математических моделей климата и возможности их решения // Успехи физических наук, 2023. Т. 193. № 9. С. 971–988. DOI: 10.3367/UFN.2023.03.039339
9. Электронный ресурс Университета Восточной Англии и центра Хедли (метеобюро Великобритании). URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature> (дата обращения 28.03.2025)
10. Kennedy J.J., Rayner N.A., Smith R.O., Saunby M., Parker D.E. Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured in situ since 1850 part 2: biases and homogenisation. *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116. D14104. DOI:10.1029/2010JD015220
11. Федоров В.М., Залиханов А.М. Оценочный прогноз изменения температурного режима Земли в XXI столетии // Окружающая среда и энергосодержание, 2021. № 4. С. 56–68.
12. Федоров В.М., Залиханов А.М., Федорова Е.В. О физической причине Североатлантической мультideкадной осцилляции // Окружающая среда и энергосодержание, 2023. № 2. С. 30–48.
13. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат. 2009. 372 с.
14. Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н. Междекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // Доклады РАН, 2012. Т. 443, № 3. С. 372–376.
15. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // МГИ, 2008. № 105. С. 158–165.
16. Schlesinger M.E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, no. 6465, pp. 723 – 726. DOI:10.1038/367723a0.
17. Knight J. R., Folland C. K., Scaife A. A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2006. vol.33, no. L17706. DOI:10.1029/2006GL026242.
18. Chylek P., Lesins. G. Multidecadal variability of Atlanhurricane activity: 1851–2007. *Journal of Geophysical Research*, 2008. vol. 113, no. D22106. doi:10.1029/2008JD010036

19. Электронный ресурс Национального управления США по исследованиям океана и атмосферы. URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (дата обращения 28.03.2025)
20. Shanahan T. M., Overpeck J.T., Anchukaitis K.J., Beck J.W., Cole J.E., Dettman D.L., Peck J.A., Scholz C.A., King J.M. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa. *Science*, 2009, vol. 324, no. 5925, pp. 377-380. DOI:10.1126/science.1166352.
21. Teegavarapu R. S. V., Goly A., Obeysekera J. Influences of Atlantic Multi-Decade Precipitation on Regional Precipitation Extremes. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 495, pp. 74-93.
22. Федоров В.М. Статистические оценки межгодовых колебаний климата. Вестник Московского ун-та. Серия 5, география, 2001. № 1. С. 16–19.

## References

1. Shuleikin V.V. Physics of the sea. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1953. 990 p. (in Russ.)
2. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the interannual variability of the Earth's insolation with daily resolution. *Solar System Research*, 2016, vol. 50, no. 3, pp. 220–224. DOI: 10.1134/S0038094616030011.
3. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999. *Springer Geology*, 2020, vol. I, pp. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6\_20.
4. Website of the National Aerospace Agency of the USA. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> (accessed 28.03.2025).
5. Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., Kuchynka, P. The planetary time series. *Reviews of Geophysics*, 2014, no. 40, 3–1–3–41.
6. Fedorov V.M. Insolation Contrast and Trends in Modern Climate Change. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022, vol. 62, no. 7, pp. 932–937. DOI: 10.1134/S001679322207009X
7. Fedorov V.M. Evolution of the modern global climate of the Earth and its possible causes. *Georisk*, 2020, vol. XIV, no. 4. pp. 16-29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29> (in Russ.).
8. Fedorov V.M. Problems of parameterization of the radiation block of physico-mathematical climate models and the possibilities of their solution. *Successes of Physical Sciences*, 2023, vol. 193, no. 9, pp. 971-988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339 (in Russ.)
9. Website of the University of East Anglia and the Hedley Center (meteobu-in the UK). URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature> (accessed 28.03.2025)
10. Kennedy J.J., Rayner N.A., Smith R.O., Saunby M., Parker D.E. Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured in situ since 1850 part 2: biases and homogenisation. *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116. D14104. DOI:10.1029/2010JD015220
11. Fedorov V.M., Zalikhanov A.M. Estimated forecast of changes in the Earth's temperature regime in the 21st century. *Journal of Environment and Energy Study*, 2021, no. 4. pp. 56-68. (in Russ.)
12. Fedorov V.M., Zalikhanov A.M., Fedorova E.V. On the physical cause of the North Atlantic multidecadal oscillation. *Journal of Environment and Energy Study*, 2023, no. 2, pp. 30-48. (in Russ.)
13. Kononova N.K. Classification of circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to B.L. Dzerdzeevsky. Moscow: Voentekhnizdat. 2009. 372 p. (in Russ.)

14. Anisimov M.V., Byshev V.I., Zalesny V.B., Moshonkin S.N. The inter-decadal variability of the thermal structure of the waters of the North Atlantic and its climatic significance. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 443, no. 3, pp. 372-376. (in Russ.)
15. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M. Sixty-year cyclicality in climate changes in the polar regions. *Moscow State Institute of Physics*, 2008, no. 105, pp. 158-165. (in Russ.)
16. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, no. 6465, pp. 723 – 726. DOI:10.1038/367723a0.
17. Knight J. R., Folland C. K., Scaife A. A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2006. vol.33, no. L17706. DOI:10.1029/2006GL026242.
18. Chylek P., Lesins. G. Multidecadal variability of Atlanhurricane activity: 1851-2007. *Journal of Geophysical Research*, 2008. vol. 113, no. D22106. doi:10.1029/2008JD010036
19. Website of the US National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (accessed 28.03.2025)
20. Shanahan T. M., Overpeck J.T., Anchukaitis K.J., Beck J.W., Cole J.E., Dettman D.L., Peck J.A., Scholz C.A., King J.M. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa. *Science*, 2009, vol. 324, no. 5925, pp. 377-380. DOI:10.1126/science.1166352.
21. Teegavarapu R. S. V., Goly A., Obeyseker J. Influences of Atlantic Multi-Decade Precipitation on Regional Precipitation Extremes. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 495, pp. 74-93.
22. Fedorov V.M. Statistical estimates of interannual climate fluctuations. *Bulletin of the Moscow University. Series 5, Geography*, 2001, no. 1. pp. 16-19. (in Russ.)

## The Trend of Changes in the Surface Temperature of the Oceans in the Current Century

<sup>1,1</sup> Valery Fedorov, <sup>1,2</sup> Kirill Degtyarev, <sup>2,3</sup> Dmitry Solovyev

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: <sup>1</sup>fedorov.msu@mail.ru, <sup>2</sup>kir1111@rambler.ru,  
<sup>3</sup> solovev@ocean.ru

**Abstract.** The estimated forecast shows an increase in ocean surface temperature (TOC) during the current century. The TPO anomaly is expected to increase by 0.625°C for the World Ocean (relative to 2020), by 0.649°C for the Northern Hemisphere, and by 0.620°C for the Southern Hemisphere. The corresponding absolute values of TPO in 2100 will be 1,068°C, 1,121°C and 1,036°C. The anomaly of the TPO of the World Ocean will increase by 2.41 times by 2100 relative to 2020.

**Keywords:** ocean surface temperature, solar radiation, insolation contrast, climate fluctuations.

УДК 621.3:621.22:620.91

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-144-159

EDN: YFJRBP

## Парусные ветроэнергетические установки с автоматическим движением платформ

<sup>1,1</sup> Чекарев Константин Владимирович [0000-0002-5140-5142],  
<sup>1,2</sup> Залиханов Алим Михайлович [0000-0002-2540-6045]

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

E-mail: <sup>1</sup>konstantintchekarev@yandex.ru,  
<sup>2</sup>bulungu@yandex.ru

**Аннотация.** Энергоустановки 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. Установка содержит платформы с системой жестких парусов, которые движутся циклически в заданном интервале перемещений. Чтобы уменьшить потери мощности, обусловленные большим временным интервалом изменения направления движения платформ, была введена система изменения скорости платформ, содержащая пружины, расположенные на концах интервала перемещений, и пружину, установленную между платформами. Были проведены исследования на макетах платформ, которые двигались в автоматическом режиме по эстакаде с системой изменения скорости платформ. Исследования показали, что существует проблема согласования процесса изменения скорости платформ в результате взаимодействия с пружинным устройством, установленным в конце интервала перемещений, и процесса изменения углового положения парусов для осуществления движения платформ в обратном направлении. Было найдено техническое решение и созданы устройства, чтобы эти процессы осуществлялись одновременно, автоматически, и с помощью простой конструкции. Были проведены эксперименты по проверке работоспособности предложенного решения, результаты которых 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 многочисленные примеры использования парусов для перемещения транспортных средств на суше [1], но это направление развития не получило. В настоящее время перемещение объектов по земле с помощью парусов осуществляется только в спортивных целях. Существует международная ассоциация World Sailing, которая проводит соревнования сухопутных парусных яхт, фиксируются рекорды скорости парусных болидов [2,3].

С развитием «зеленой» энергетики, установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали очень широко использоваться для производства электроэнергии. Они устанавливаются на суше, вблизи морского берега и на море. В большинстве действующих ветровых установок преобразование энергии ветрового потока в электроэнергию осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на высокой опоре. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция башни, мощный фундамент 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 [4]. 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 низкая эффективность преобразования энергии ветрового потока, 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 харак-

тер движения платформ. Предложен вариант парусной энергетической установки, в которой платформы движутся циклично в заданном интервале перемещений перпендикулярно направлению ветра [5]. Изменение направления движения в конце интервала перемещений в такой установке осуществлялось с помощью системы изменения положения парусов. На концах интервала перемещений паруса изменяют положение и платформы начинают двигаться в противоположную сторону.

Была создана экспериментальная установка для проведения исследований на макетах парусных платформ. Целью исследований было проверка функционирования входящих в установку систем и разработка методик определения технических характеристик ветроэнергетической установки. В процессе проведения экспериментов выяснилось, что для получения точных значений технических характеристик, 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 величины сил, действующих на платформы [6], по определению коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока [7], а также эксперименты по увеличению мощности ветроэнергетической установки наземного базирования [8].

Для повышения эффективности преобразования энергии ветрового потока на платформах была установлена система жестких парусов, выполненная в виде вертикальной рамки, в которую вставлялся набор из жестких пластин. Известно, что устанавливаемые на морских судах жесткие паруса оказываются более эффективными по сравнению с традиционными парусами [9]. Жесткие паруса были установлены на сухопутных яхтах для достижения рекордных скоростей в 209 км/час и 222 км/час [10]. Последний рекорд был поставлен в декабре 2022 года чемпионом яхтенной гонки Кубок Америки 2021 года [11]. Для определения эффективности функционирования системы жестких парусов были проведены эксперименты по определению технических характеристик, таких как скорость платформ при разном количестве пластин в системе жестких парусов [12], величина действующих на платформу сил и определение коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока [13].

При циклическом движении платформ, при котором изменение направления их движения осуществляется за счет сил, действующих на паруса платформ, происходит потеря мощности установки, поскольку платформы должны остановиться, а затем вновь набрать скорость в обратном направлении. Изменение скорости платформ осуществляется за счет аэродинамических сил, действующих на паруса, на что требуется значительный временной интервал. Была разработана и создана конструкция установки, позволившая уменьшить временной интервал изменения скорости платформ при изменении направления их движения. В установку была введена система изменения скорости платформ, содержащую

пружины, расположенные на опорах, задающих интервал перемещений платформ, и пружину между платформами [14]. Были проведены эксперименты, в которых остановка платформ происходила за счет сил сжатия пружин, при этом кинетическая энергия платформы переходила в энергию сжатия пружин. После остановки платформы набирали скорость за счет сил, действующих как со стороны пружин, в результате изменение скорости платформ осуществлялось приблизительно в пять раз быстрее, чем при изменении направления движения платформ за счет аэродинамических сил, действующих на паруса платформ. При движении состава из двух или большего количества платформ с установленными между ними пружинами был разработан механизм устранения колебаний платформ, которые неизбежно возникли бы при изменении направления движения платформ в результате взаимодействия платформ с пружинными устройствами, установленными в конце интервала перемещений. Возникновение колебаний платформ осуществлялось путем введения ограничителя колебаний платформ друг относительно друга. Эксперименты показали работоспособность созданной конструкции установки, однако выяснилось, что существует проблема согласования процесса изменения скорости платформ в результате взаимодействия с пружинными устройствами, и процесса изменения углового положения парусов для осуществления движения платформ в обратном направлении. Для того, чтобы временной интервал изменения скорости платформ был минимальным, необходимо, чтобы эти процессы проходили одновременно. Было найдено техническое решение организации такого процесса с помощью простой конструкции, разработаны и изготовлены конструкции устройств для его осуществления и проведены исследования по проверке функционирования созданной экспериментальной установки.

### **3 Экспериментальная установка, методика проведения экспериментов**

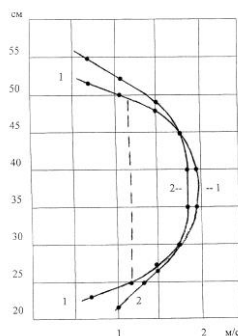
Экспериментальная установка включала следующие элементы: генератор ветрового потока (ГВП), два макета платформ, на каждом из которых была установлена система жестких парусов, и регулирующие опоры, которые крепились в конце интервала перемещений платформ. На каждой из регулирующих опор было установлено пружинное устройство изменения скорости платформ и устройство изменения положения парусов. Кроме этого между платформами было установлено пружинное устройство с ограничителем перемещений платформ друг относительно друга.

Изображение генератора ветрового потока и эстакад для движения платформ представлено на Рис.1.



**Рис. 1.** Генератор ветрового потока (верхняя часть снимка) и эстакады для движения платформ (на переднем плане, внизу).

Поверхности для движения платформ по эстакаде были выполнены из пластиковых профилей размером 25x16 мм, расположенных на расстоянии друг от друга и отстоящих от горизонтальной плоскости на расстоянии 160 мм. В середине эстакады был расположен направляющий рельс, выполненный из пластикового профиля размером 12x 12 мм, на котором была нанесена разметка с интервалом 10 см. Направляющий рельс эстакады отстоял от генератора ветрового потока на расстоянии 50 см. 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 вертикальных плоскостях. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от ГВП на расстоянии 50 см и 70 см, представлен на Рис.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).

На макетах платформ были установлены системы жестких парусов с набором из 4 полос. Изображение макетов платформ с системой жестких парусов представлено на Рис. 3.

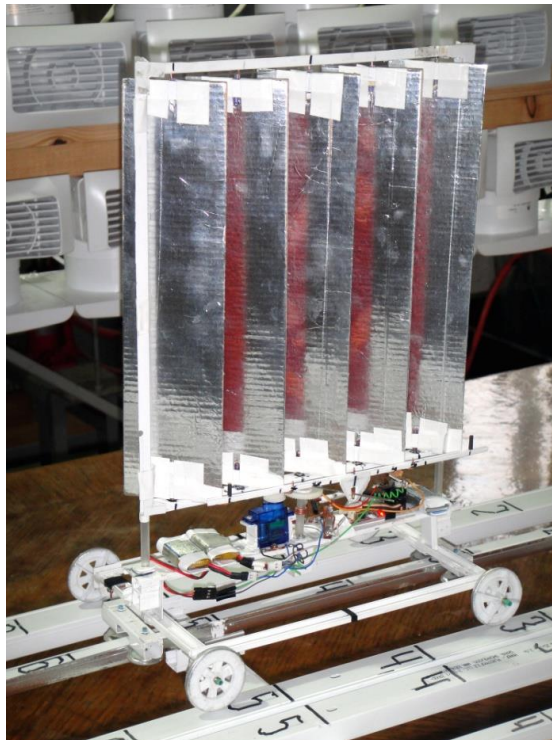


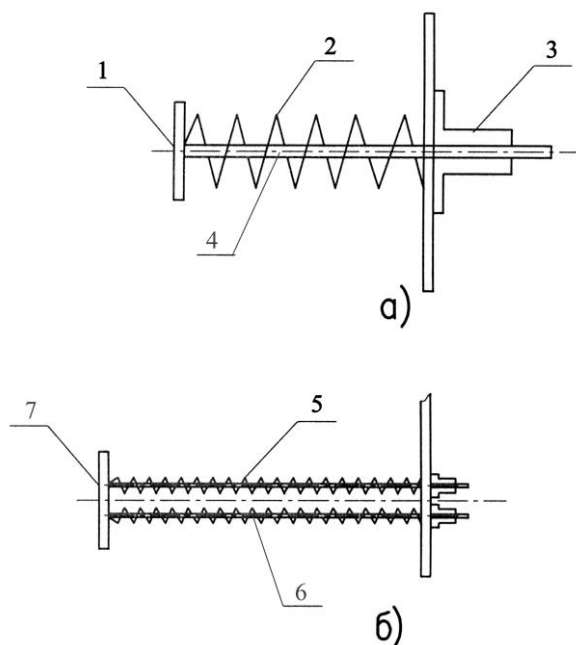
Рис. 3. Макет платформы с системой жестких парусов.

К рамке основания платформы прямоугольной формы размером 22 см x 17 см, крепились 4 пластмассовых колеса диаметром 40 мм. В середине платформы, на расстоянии 3 см по высоте, крепилась опорная 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 трубкам крепилась прямоугольная рамка шириной 22 см и высотой 26 см, сделанная из тонкого пластикового уголка размером 6x6 мм. Нижняя сторона рамки находилась на расстоянии 10 см от поверхности, по которой двигалась платформа. В рамку был вставлен набор из 4-х жестких полос шириной 7,5 см и высотой 25,5 см, отстоящих друг от друга на расстоянии 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. Поворот полос на заданный угол осуществлялся с помощью тонкой рейки, прикрепленной с

одной стороны к нижнему углу каждой полосы подвижным соединением. Перемещением рейки вправо или влево все полосы одновременно поворачивались на угол  $\pm 90^\circ$ . Количество полос, установленных в рамках, было выбрано таким, чтобы перемещение рейки при повороте полос было оптимальным.

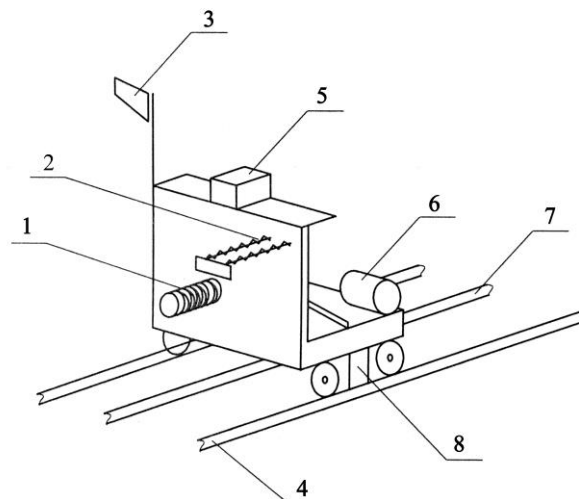
Траектория движения платформы задавалась направляющей системой, которая включала расположенный на середине эстакады направляющий рельс и 4 колеса диаметром 15 мм, закрепленных по 2 на коротких сторонах рамки основания платформы. Их оси были направлены вертикально, находились на расстоянии 32 мм и были установлены так, чтобы направляющий рельс находился между ними. При таком расположении колес платформа свободно перемещалась вдоль направляющего рельса.

К регулирующим опорам было прикреплено пружинное устройство изменения скорости платформ, схема которого показана на Рис.4 а.



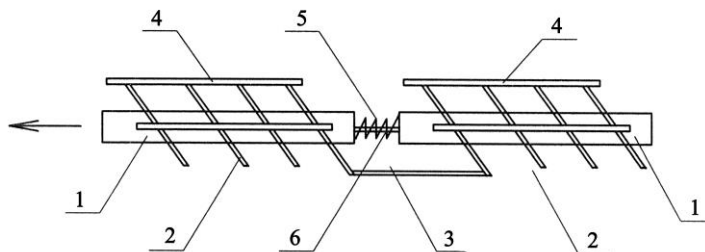
**Рис 4 а).** Пружинное устройство изменения скорости платформ (на схеме: 1 - фланец; 2- пружина; 3 – втулка; 4 – круглый стержень); б) Устройство для автоматического изменения углового положения пластин жестких парусов (на схеме: 5 – пружина; 6 – круглый стержень; 7 – прямоугольная пластина).

Сверху к опорам крепилось устройство для автоматического изменения углового положения пластин жестких парусов, выполненное в виде пластины с прямоугольной полоской на конце (Рис. 4 б). На Рис.5 изображена принципиальная схема регулирующей опоры, на которой установлены элементы показанные на Рис 4 а и Рис. 4 б.



**Рис. 5.** Регулирующая опора (на схеме: 1 - пружинное устройство изменения скорости платформ; 2 - устройство для автоматического изменения углового положения пластин жестких парусов; 3 – датчик направления ветра; 4 – радиальный путь; 5 – навигационная система; 6 – электромотор; 7 – токосъемный рельс; 8 – механический или магнитный фиксатор).

Длина пластины могла регулироваться с помощью двух небольших шурупов. Для контакта платформы с пружинными устройствами на обоих концах опорной рейки платформы приклеивалась вертикальная квадратная пластина размером 25 мм. При движении двух платформ, для уменьшения нагрузки на пружинное устройство на регулирующих опорах, между платформами устанавливалась пружина. Для устранения колебаний платформ между ними крепился ограничитель перемещений платформ относительно друг друга, выполненный в виде прочной нити, длина которой была равна длине пружины в несжатом состоянии. Ограничитель препятствует растяжению пружины между платформами после того, как передняя по ходу платформа, после взаимодействия с пружинным устройством на регулирующих опорах, сообщает соединенной с ней платформе дополнительный импульс, который вызывает колебания платформ если ограничитель отсутствует. При циклическом движении двух платформ автоматическое изменение положения пластин парусной системы первой по ходу платформы осуществляется с помощью устройства изменения углового положения парусов, закрепленного на регулирующих опорах. Для поворота пластин системы жестких парусов, установленных на второй платформе, нижний угол последней пластины на первой платформе соединен крепкой нитью с нижним углом первой пластины второй платформы, как это показано на Рис 6. На этой же схеме показано пружинное устройство, которое устанавливается между платформами, и ограничитель перемещений платформ относительно друг друга.



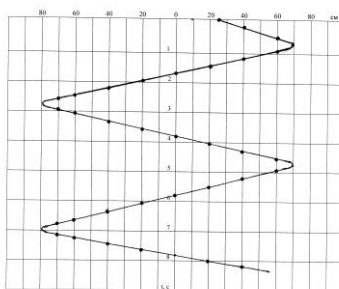
**Рис. 6.** Пружинное устройство, устанавливаемое между платформами и ограничитель перемещений платформ относительно друг друга (на схеме: 1 – опорная рейка; 2 – пластина жесткого паруса; 3 – соединительный трос; 4 – рейка, соединяющая жесткие паруса платформы и обеспечивающая одновременный поворот системы парусов; 5 – пружина; 6 – ограничитель перемещений платформ относительно друг друга).

При проведении экспериментов движение платформ снималось на видеокамеру. После обработки полученных записей, строились графики перемещения платформ в зависимости от времени, по которым определялась их скорость и другие параметры движения платформ.

#### 4 Результаты экспериментов и обсуждение

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии исследовалось функционирование разработанной конструкции энергетической установки при движении одной и двух платформ. Во второй серии проводились эксперименты при движении одной и двух платформ на разных интервалах перемещений.

Эксперименты показали, что предложенная конструкция энергетической установки работает эффективно. На Рис.7 приведен график перемещений одной платформы в зависимости от времени при движении платформы на интервале перемещения 2 метра.



**Рис. 7.** График временной зависимости перемещений одной платформы на интервале 2 метра.



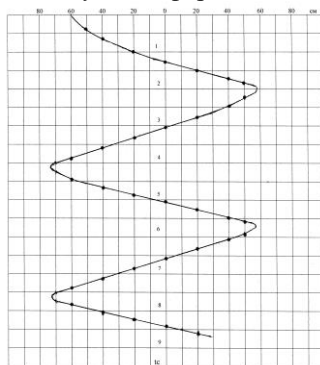
По представленному графику можно определить скорость платформы, которая равна  $V = 83$  см/с для всех направлений перемещений. Однако при таком масштабе представления временной интервал изменения скорости платформы при изменении направления определить невозможно, но его можно легко посчитать. Как было показано в статье [14], временной интервал изменения направления скорости платформы в результате взаимодействия с пружинным устройством, установленным на регулирующей опоре равен

$$\Delta t = 4\sqrt{m/k} \quad (1)$$

где  $m$  - масса платформы, а  $k$  - коэффициент упругости пружины. Подставляя в выражение (1) значения  $m = 126$  г и  $k = 100$  н/м, получаем, что время взаимодействия платформы с пружиной равно  $\Delta t = 0,14$  с. По записям движений платформ, на которых имеется цифровой индикатор времени с точностью до одной сотой секунды, можно определить, что время взаимодействия платформы с пружиной в эксперименте составляло  $\Delta t = 0,15$  с, что близко к расчетному.

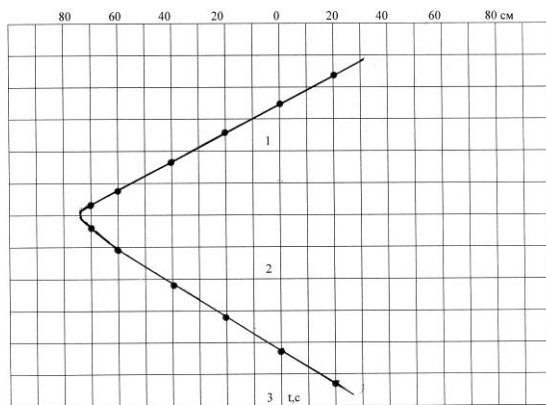
Одновременно с изменением направления движения платформы автоматически осуществляется изменение положения пластин жестких парусов в результате того, что закрепленная на их нижних концах рейка упиралась в вертикальную полосу, закрепленную на конце планки установленной на регулирующей опоре. При сжатии пружины, установленной на регулирующей опоре, закрепленная на пластинах жестких парусов рейка смещается назад относительно платформы и пластины парусной системы поворачиваются до тех пор, пока они не перейдут положение, параллельное ветровому потоку. Далее под действием аэродинамических сил ветрового потока пластины резко повернутся на фиксированный угол  $45^\circ$ . Общий поворот пластин составляет угол  $90^\circ$ .

Эксперименты с движением двух платформ показали, что предложенная конструкция изменения положения пластин второй платформы работает эффективно. При повороте пластин парусной системы первой по ходу платформы, соединяющая две парусные системы прочная нить тянет пластины системы парусов второй платформы и они поворачиваются на угол  $90^\circ$  одновременно с пластинами парусной системы первой платформы. На Рис.8 показан график перемещений в зависимости от времени двух платформ на интервале перемещений 2 м.



**Рис. 8.** График временной зависимости перемещений двух платформ на интервале перемещений 2 метра.

Перемещение начинается с момента ручного пуска платформ, после чего платформы набирают скорость и затем взаимодействуют с пружинным устройством, установленным на регулирующей опоре. Как видно из графика на Рис 8, только после третьего взаимодействия с пружинными устройствами равномерное движение устанавливается вскоре после взаимодействия с пружинным устройством. Временные параметры взаимодействия с пружинными устройствами, установленными на опорах, и изменения положения пластин парусной системы того же порядка, как и у одной платформы. На Рис. 9 представлен график зависимости перемещений двух платформ при взаимодействии с пружинным устройством на регулирующей опоре, представленный в увеличенном временном масштабе, по которому можно оценить временной интервал изменения скорости платформ.



**Рис. 9.** график перемещений двух платформ в увеличенном временном масштабе при изменении направления движения в результате взаимодействия с пружинными устройствами, установленными на регулирующей опоре и между платформами.

Во второй серии экспериментов проводилось исследование перемещений на разных интервалах одной платформы, и двух платформ с установленной между ними пружиной. В предварительных экспериментах было замечено, что платформы на разных интервалах перемещений движутся с разной скоростью. Причина такого движения объясняется тем, что при начале движения с нулевой скоростью платформы начинают набирать скорость, двигаясь с ускорением, как это показано на Рис.8.

Величина набранной скорости до взаимодействием с пружинным устройством на управляющей опоре зависит от пройденного расстояния: чем меньше расстояние, тем меньше величина набранной скорости. При взаимодействии платформы с пружинным устройством величина скорости платформы в обратном направлении меньше, чем скорость, с которой платформа сталкивается с пружин-

ным устройством. Потеря скорости быстро компенсируется за счет аэродинамических сил, действующих на паруса, установленные на платформе. За счет этих сил платформа может также увеличить свою скорость, величина которой определяется величиной интервала перемещений. Вначале были проведены эксперименты с одной платформой на интервалах перемещений в диапазоне 2,0 - 0,4 м. В Таблице 1 приведены значения скоростей установившихся циклических движений одной платформы в этом диапазоне перемещений, а в таблице 2 значения скоростей двух платформ в диапазоне перемещений 2,0-0,8 м. Символ L в таблицах означает расстояние между регулирующими опорами, названное диапазоном перемещений платформ, а символ S означает фактическую величину перемещений платформ в данном диапазоне перемещений.

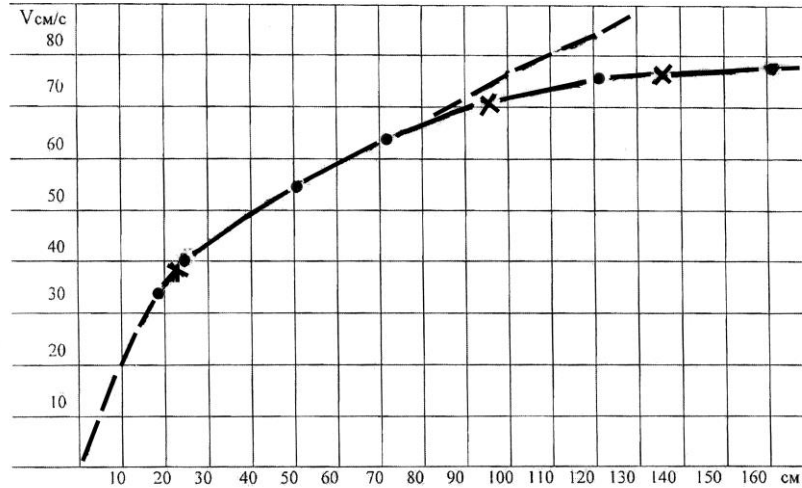
**Таблица 1.** Значения скоростей установившихся циклических движений одной платформы в диапазоне перемещений 2,0-0,4м.

L, м	S, см	Направление движения	$\nabla t$ , с	V, см/с
2	161	→	2,03	79,3
		←	2,04	78,5
1,5	121	→	1,56	77,5
		←	1,57	77,0
1	71	→	1,10	64,5
		←	1,12	63,4
0,8	50	→	0,91	54,9
		←	0,93	53,7
0,6	25	→	0,60	41,6
		←	0,62	40,3
0,4	18	→	0,53	34,0
		←	0,54	33,3

**Таблица 2.** Значения скоростей установившихся циклических движений двух платформ в диапазоне перемещений 2,0-0,8м.

L, м	S, см	Направление движения	$\nabla t$ , с	V, см/с
2	135	←	1,77	76,2
		→	1,78	75,8
1,5	95	←	1,33	71,4
		→	1,32	71,2
0,8	24	←	0,63	38,1
		→	0,64	37,5

На Рис.10 представлен график приведенных в Таблицах 1 и 2 значений скоростей V установившихся циклических движений вправо одной и двух платформ в зависимости от величины фактических перемещений платформ S.



**Рис. 10.** График представленных в Таблице 1 и Таблице 2 значений скорости  $V$  в зависимости от расстояния  $S$  перемещения установившихся циклических движений вправо одной и двух платформы (● - одна платформа; X - две платформы).

Из графика видно, что зависимость скорости платформ от величины их фактического пробега является общей для одной и двух платформ. Это дает основание определять оптимальный интервал перемещений любого состава платформы. Кривую на Рис.10 в интервале значений  $S = (0 - 90 \text{ см})$  можно аппроксимировать функцией

$$V = k_s \sqrt{S} \quad (2)$$

где  $k_s = 7,7 \sqrt{\text{см}}/\text{с}$ . Приведенное значение коэффициента относится к экспериментальной установке, на которой проводились исследования. Выше указанного значения аппроксимации  $S$  достигается равенство нулю всех сил, действующих на платформу, после чего платформы движутся с максимальной для данной установки скоростью. Мощность сил ветрового давления  $F$ , действующих на установленные на платформах паруса равна произведению силы  $F$  на скорость перемещения платформ  $V$

$$W = F V \quad (3)$$

Это означает, что выражение (2) можно использовать для регулирования мощности установки путем изменения диапазона перемещений платформ.

## 5 Выводы

Для повышения эффективности преобразования энергии ветрового потока в состав парусной энергетической установки наземного базирования были введены регулирующие опоры, которые крепились на концах интервала перемещений

платформ. На каждой из регулирующих опор было установлено пружинное устройство изменения скорости платформ и устройство изменения углового положения парусов, а между платформами было установлено пружинное устройство с ограничителем перемещений платформ относительно друг друга. Эксперименты, проведенные на макетах платформ с системой жестких парусов, показали, что все введенные в установку элементы функционируют нормально. Введенные в установку элементы позволяют:

- процесс изменения углового положения парусов производить автоматически одновременно с процессом изменения скорости платформ при их взаимодействии с пружинными устройствами, установленными на регулирующих опорах;
- существенно упростить конструкцию устройства, осуществляющего процесс изменения углового положения парусов;

Установленная зависимость величины скорости циклических движений платформ от интервала их перемещения позволяет регулировать в определенном диапазоне мощность парусной энергетической установки наземного базирования путем изменения величины интервала перемещений платформ.

## 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](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. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
5. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования // Окружающая среда и энерговедение: №2 (14), 2022. С.77-90. <http://jeees.ru/category/journal/2022-2/>
6. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энерговедение. № 3 (15), 2022, сс. 67-79. <http://jeees.ru/category/journal/2022-3/>
7. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: увеличение мощности // Окружающая среда и энерговедение: № 4 (16) 2022, сс.59-70 . <http://jeees.ru/category/journal/2022-4/>
8. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энерговедение // № 2 (18), 2023, сс. 49-61. // <http://jeees.ru/category/journal/2023-2/>
9. Нильсен П. Стали ли вингсьют-парусники мейнстримом? // Sail. // 2 августа 2017 г. // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream>
10. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // [https://www.fisly.org/newsletter/20221212\\_Landsailing\\_Record.pdf](https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf)

11. 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».
12. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Ветроэнергетическая установка наземного базирования с жесткими парусами // *Окружающая среда и энерговедение*. № 1 (21), 2024, с.с. 100-113. <http://jeees.ru/category/journal/2024-1/>
13. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Ветроэнергетическая установка с жесткими парусами: прямое измерение сил, действующих на платформу // *Окружающая среда и энерговедение*. № 3 (23), 2024, с.с. 83-95. <http://jeees.ru/category/journal/2024-3/>
14. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусные ветроэнергетические установки: уменьшение потерь мощности при циклическом движении платформ // *Окружающая среда и энерговедение*. № 4 (24), 2024, с.с. 16-33. <http://jeees.ru/category/journal/2024-4/>

## References

1. Digai P. Pod parusami po relsam. // *Yacht Russia*, # 8 (77), 2015 // [https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles\\_391.html](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. 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 //
5. 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/>
6. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: nakhojdenie velichiny sil, deistvuiuschih na platformu // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. №3 (15), 2022. pp.67-79. <http://jeees.ru/category/journal/2022-3/>
7. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: uvelichenie moschnosti. // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 4 (16) 2022. pp. 59-70. <http://jeees.ru/category/journal/2023-4/>
8. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: metod priamogo izmereniya sil, deistvuiushih na na platformu. // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 2 (18), 2023, pp. 49-61. <http://jeees.ru/category/journal/2023-2/>
9. Nielsen P. // Have Wingsails Gone Mainstream? // *Sail Magazine* // 2.08/2017 // <https://www.sailmagazine.com/diy/have-wingsails-gone-mainstream/>
10. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // [https://www.fisly.org/newsletter/20221212\\_Landsailing\\_Record.pdf](https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf)
11. <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm> «Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час»/
12. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Vetroenergeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya s zhostkimi parusami // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 1 (21), 2024, pp. 100-113. <http://jeees.ru/category/journal/2024-1/>
13. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Vetroenergeticheskaya ustanovka s zhostkimi parusami: priamoe izmerenie sil, deistvuiuschih na platformu // *Okruzhayushchaya sreda I energovedenie*. № 3 (23), 2024, pp. 83-95. <http://jeees.ru/category/journal/2024-3/>

14. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnye vetroenergeticheskie ustanovki: umenshenie poter moschnosti pri chiklicheskom dvizhenii platform // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 4 (24), 2024, pp. 16-33. <http://jeees.ru/category/journal/2024-4/>

## **Sailing Wind Power Plants with Automatic Platform Movement**

<sup>1,1</sup> Konstantin Chekarev, <sup>1,2</sup> Alim Zalikhanov

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: <sup>1</sup>konstantintchekarev@yandex.ru,  
<sup>2</sup>bulungu@yandex.ru

**Abstract.** High-power power plants that convert kinetic wind energy into electricity are large in size due to their low air density, which leads to the need to build large structures when using wind turbines 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. The installation contains platforms with a system of rigid sails that move cyclically in a given range of movements. In order to reduce power losses caused by a large time interval for changing the direction of movement of the platforms, a platform speed change system was introduced, containing springs located at the ends of the travel interval and a spring installed between the platforms. Studies were conducted on mock-ups of platforms that moved automatically along an overpass with a platform speed control system. Studies have shown that there is a problem of matching the process of changing the speed of the platforms as a result of interaction with a spring device installed at the end of the displacement interval, and the process of changing the angular position of the sails to move the platforms in the opposite direction. A technical solution was found and devices were created so that these processes could be carried out simultaneously, automatically, and using a simple design. Experiments were conducted to verify the operability of the proposed solution, the results of which are presented in this article.

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

УДК 556.334

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-160-171

EDN: YSRAYF

## Тепловое загрязнение деятельного слоя почвы при эксплуатации геотермального месторождения

Щербуль Зинаида Захаровна<sup>[0009-0009-6421-2786]</sup>

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

E-mail: ipgzina@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются региональные особенности микроклимата почв в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки, связанной с эксплуатацией объектов геотермальной энергетики. Вследствие избыточного поступления тепла от добывающих скважин, существенно изменяется характер распределения температур в прискважинных зонах. В деятельном слое почвы возникают локальные тепловые аномалии, процесс формирования которых усложняется воздействием амплитуд суточного хода температур, проникающих до глубины постоянной температуры почвы. Модельные расчёты показывают значительное снижение относительных амплитуд колебания суточных, сезонных и годовых температур в пределах радиуса влияния скважины. Температура на поверхности почвы существенно возрастает в радиусе одного метра от устья скважин, что не оказывает большого влияния на микроклимат в районе месторождения, однако с глубиной превышение температуры над фоновой быстро возрастает. Наблюдения за реакцией экосистемы на потепление почвы при эксплуатации геотермальных месторождений может стать исследовательской базой для изучения влияния глобального потепления на окружающую среду.

**Ключевые слова:** тепловое загрязнение, геотермальное месторождение, деятельный слой почвы, окружающая среда, экологические риски.

### 1 Введение

В процессе строительства и эксплуатации объектов геотермальной энергетики различных типов возникает ряд проблем, непосредственно связанных с экологическими рисками для окружающей природной среды, в число которых входят:

1) изъятие земель под строительство ГеоТЭС и ухудшение рекреационного качества территории [1,2];



2) химическое загрязнение окружающей среды при сбросе отработанных вод на поверхность почвы и водные объекты, а также в результате выброса в атмосферу пара, газов и аэрозолей при эксплуатации ГеоТЭС (среди токсичных компонентов геотермальных вод, выход которых может привести к нежелательным экологическим последствиям, отмечены: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Rn, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, As, B, Hg, Pb, Cd, Fe, Zn, Mn, Li, Al) [1,2,3];

3) загрязнение подземных вод и водоносных пластов [4];

4) истощение ресурсов подземных вод (являющихся естественным источником геотермальной энергии), влияющих на их возобновляемость; «возобновляемость не является безусловной, поскольку способность геотермального резервуара к самообновлению может быть снижена такими факторами, как высокая скорость отбора» и др. [5];

5) опасные геологические процессы, такие как оседание поверхности земли от депрессий в эксплуатируемых пластах и повышение сейсмической активности территории при обратной закачке теплоносителя [2,5];

6) тепловое загрязнение геологической среды и водных объектов при эксплуатации геотермальных месторождений.

Тепловое загрязнение геологической среды, связанное с геотермальным производством, - наименее изученное явление, сопровождающее долговременную работу эксплуатационных термальных скважин. Изучение динамики изменения естественного температурного поля геотермального месторождения позволит прогнозировать повышение температуры на поверхности земли, в деятельном слое почвы и грунтовых водах, оценить выброс тепла в атмосферу и поверхностные воды. О важности подобных исследований говорит тот факт, что «недавно геотермально нагретые экосистемы были идентифицированы как дополнительные эксперименты по естественному потеплению, в ходе которых можно исследовать долгосрочную адаптацию сообществ реального мира к естественным температурным градиентам» [6].

Температура почвы оказывает доминирующее влияние на развитие корневой системы, жизнедеятельность бактерий и микроорганизмов в почвах, на процессы поглощения растениями питательных веществ, а также на микроклимат и ландшафт территории. Экспериментальные и модельные исследования температуры почвы на геотермальных месторождениях помогут понять и предсказать реальное поведение региональных экосистем. В исследовании [7] «проанализировали влияние геотермального потепления на растительность путем оценки скорости регенерации растений и биомассы корней в широком диапазоне температур почвы и химических свойств почвы». Было установлено, что «температура почвы окажет гораздо большее влияние на регенерацию растительности над и под землей, чем другие переменные окружающей среды» [7].

Изменчивость температуры также «крайне важна с экологической точки зрения... Жизнедеятельность организмов, которые в природе обычно подвергаются воздействию переменных температур, подавляется частично или полностью или замедляется при воздействии постоянной температуры» [8].

Разность между максимумом и минимумом температуры в суточном или годовом ходе называется амплитудой хода температуры. На амплитуду суточного

хода температуры поверхности почвы влияют следующие факторы: время года; географическая широта; рельеф местности; цвет и структура почвы; влажность почвы. Режимные наблюдения за температурой почвы проводятся на нескольких стандартных глубинах, в результате чего формируется база пространственных и временных данных, позволяющая выявить основные закономерности пространственного распределения температуры поверхности почвы и почвы на глубинах.

Количество воды, необходимое для растений, обеспечивается естественным притоком в почву от осадков, грунтовых вод, поверхностных вод, внутрпочвенного притока и конденсации атмосферной влаги. Расход осуществляется через поверхностный и подземный сток, транспирацию, поверхностное и глубинное испарение. Если при уменьшении температуры скорость движения воды в почве замедляется и снижаются темпы поглощения корнями питательных веществ, то при росте температур в приповерхностной зоне будет возрастать скорость испарения с зеркала грунтовых вод, что приведет к снижению их уровня. В [9] приводится следующая формула для расчёта глубины грунтовых вод, с которых происходит испарение:  $L = 170 + 8t + 15$ , где  $L$  – критическая глубина грунтовых вод,  $t$  – среднегодовая температура воздуха исследуемой территории, измеряемая на высоте 2 м над поверхностью земли. Для Махачкалы, со среднегодовой температурой воздуха  $13^{\circ}\text{C}$ , критическая глубина равна 2,9 м. Значительное уменьшение влагообеспеченности почв при росте температур в деятельном слое (в метеорологии – слой почвы, температура которого испытывает суточные и сезонные колебания и простирается до слоя постоянной годовой температуры) приводит к иссушению почвы [10] и так называемой «почвенной засухе».

При эксплуатации геотермальных объектов, вследствие избыточного поступления тепла от добывающих скважин, существенно изменяется характер распределения температур в прискважинных зонах. Формируются локальные температурные аномалии, которые в деятельном слое почвы усложняются воздействием амплитуд суточного хода температуры, проникающих до глубины постоянной температуры почвы. Значительное превышение температуры над фоновой становится причиной повышенной агрессивности не только грунтовой толщи, но и подземных вод и открытых водоёмов, находящихся в зоне геоэкологического влияния аномалий. Повышение температуры воды в открытых водоёмах может существенно влиять и на микроклимат окружающей территории, повышая относительную влажность и норму естественных осадков, а также пагубно влиять на жизнь водных организмов и структуру подводного растительного мира. Выявление региональных особенностей микроклимата почв в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки особенно важно для территорий с аридным климатом, где нет поверхностного стока, и основная подпитка грунтовых вод происходит из нижележащих водоносных горизонтов, содержащих напорные артезианские воды. Именно к таким относится территория Терско-Кумского междуречья Северного Дагестана.

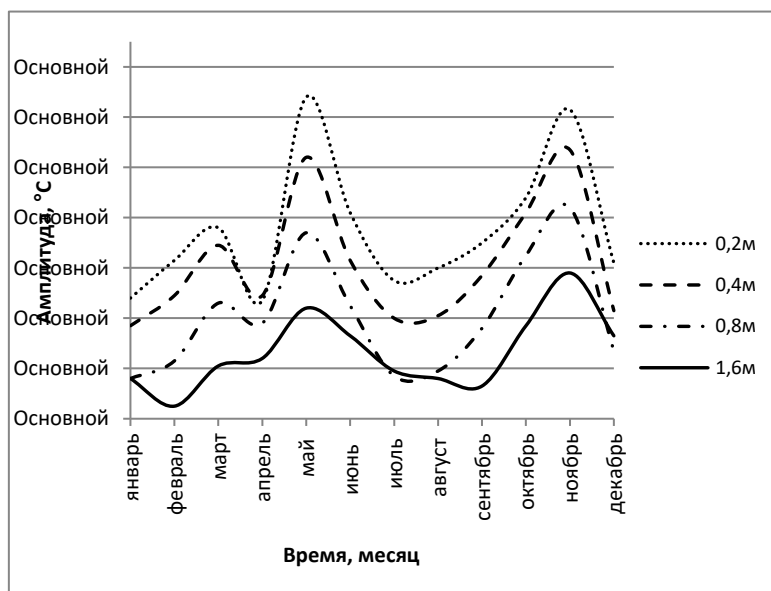
## 2 Данные и постановка задачи

С целью изучения динамики изменения естественного температурного поля в пределах природно-антропогенного объекта Махачкалинского геотермального месторождения [11,12], на основе данных Махачкалинской гидрометеостанции сформирована локальная база среднесуточных температур воздуха (наблюдения с 1882 года), поверхности почвы и почвы на глубинах (с 2007 года). В таблице 1 приводятся усреднённые за пятнадцатилетний период наблюдений среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха, поверхности почвы и почвы на глубинах в пределах деятельного слоя.

**Таблица 1.** Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха, поверхности почвы и почвы на глубинах в °С

Месяц	воздух	поверхность	- 0,2м	- 0,4м	- 0,8м	- 1,2м	- 1,6м
Январь	3,3	3,3	3,8	4,3	5,9	7,5	9,2
Февраль	1,4	3,1	4,5	5,0	6,4	7,7	8,8
Март	4,8	7,6	7,7	7,5	7,7	8,2	9,0
Апрель	9,4	13,4	13,0	12,5	11,8	11,6	11,5
Май	16	22,5	20,1	18,7	16,7	15,4	14,6
Июнь	22,2	28,4	26,9	25,5	22,9	21,0	19,3
Июль	23,4	29,7	29,2	28,2	26,2	24,1	22,3
Август	26,5	31,5	31,2	30,1	28,1	26,1	24,3
Сентябрь	22,8	27,2	28,0	27,7	26,9	26,0	24,6
Октябрь	16,5	18,4	19,8	20,3	21,2	22,1	21,8
Ноябрь	6,5	7,1	9,1	10,5	1,2	15,5	16,6
Декабрь	3,9	4,1	5,4	6,3	8,4	10,3	11,9
Среднегод. температуры	13,1	16,4	16,6	16,4	16,3	16,3	16,2

В средних широтах слой постоянной суточной температуры находится на глубине 70-100см, в рассматриваемой области, как показано на рис.1, на глубине 1,6м – максимальной глубине замера температуры на метеостанции (Дагестанский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) - амплитуды колебания температур не затухают, изменяясь от 0,5°С (в феврале) до 5,8°С (в ноябре). Амплитуды годового хода температуры почвы на разных глубинах определяются как разность между наибольшей и наименьшей температурой месяца на данных глубинах (рис.1).



**Рис.1.** Амплитуды годового хода температуры на глубинах по Махачкале

Рассмотрим, как меняется в процессе эксплуатации добывающей геотермальной скважины температурное поле поверхностных и более глубоких (до 160 см) слоёв почвы, где находится основная часть корневой системы растений. Как отмечается в [13], степные же растения «на 90—95 % расположены в верхнем полуметровом слое почвы. Этот горизонт в степной экосистеме самый неустойчивый и по условиям увлажнения, и по термическому режиму».

Математическое моделирование процесса теплопереноса вокруг одиночной эксплуатационной скважины сводится к решению профильной нестационарной задачи теплопроводности для прямоугольной области:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где  $a$  – температуропроводность глинистой кровли. Ось  $X$  направлена вдоль верхней границы области, ось  $Z$  – вертикально вниз.

На левой границе рассматриваемой прямоугольной области  $H \times L$  (где  $H$  – глубина скважины,  $L$  – длина пласта), расположена геотермальная добывающая скважина, правая граница – на расстоянии  $L$  от скважины. На нижней границе – эксплуатационный горизонт, верхняя граница проходит по воздуху, на расстоянии  $h$  (0,2м) от поверхности почвы. Допустим, что температура в пласте постоянная и равна  $T_{пл.}$ , температура по всей длине скважины на момент начала расчёта устанавливается равной  $T_{пл.}$ , на правой границе температура меняется в соответствии с естественным годовым ходом температур в деятельном слое почвы и на глубинах. В качестве начального температурного поля берётся годовой ход среднесуточных температур воздуха, поверхности почвы и почвы на глубинах от 0,2м до 1,6м; с глубины 1,6м, где температура фактическая, до глубины  $H$ , где

температура постоянная (равная  $T_{пл}$ ), температура распределяется по линейному закону.

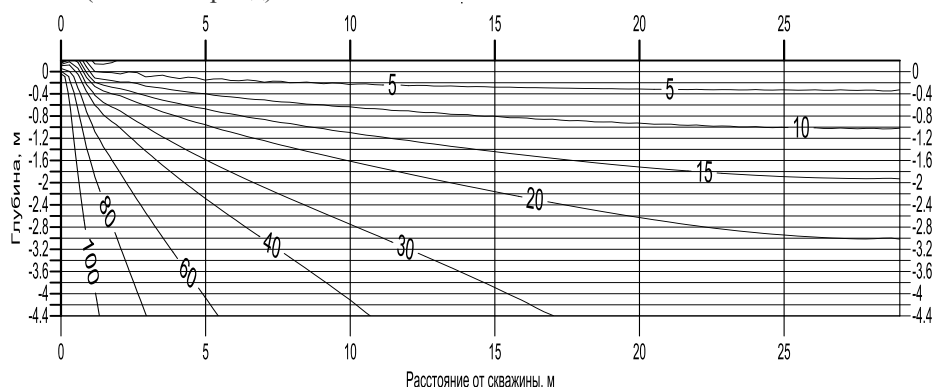
Таким образом, начальные и граничные условия для уравнения теплопроводности можно записать в следующем виде:

1)  $T(x,z,t)|_{t=0} = T_0(z)$ ; 2) на нижней границе  $T(x,z,t)|_{z=H+h} = T_{пл}$ ; 3) на левой границе  $T(x,z,t)|_{x=0} = T_{пл}$ ; 4) на верхней границе  $T(x,z,t)|_{z=0} = T(t)$ ; 5) на правой границе  $\partial T/\partial x|_{x=L} = 0$ .

Численное решение поставленной задачи [14,15] проводится по явной схеме на неравномерной сетке; в деятельном слое почвы шаг по вертикали составляет 0,2м, шаг сетки по горизонтали равен одному метру по всей длине пласта. Расчёты производились для пластовых температур от 60°C до 150°C и для промежутков времени от 1 года до 10 лет с учётом естественных колебаний температур.

### 3 Результаты

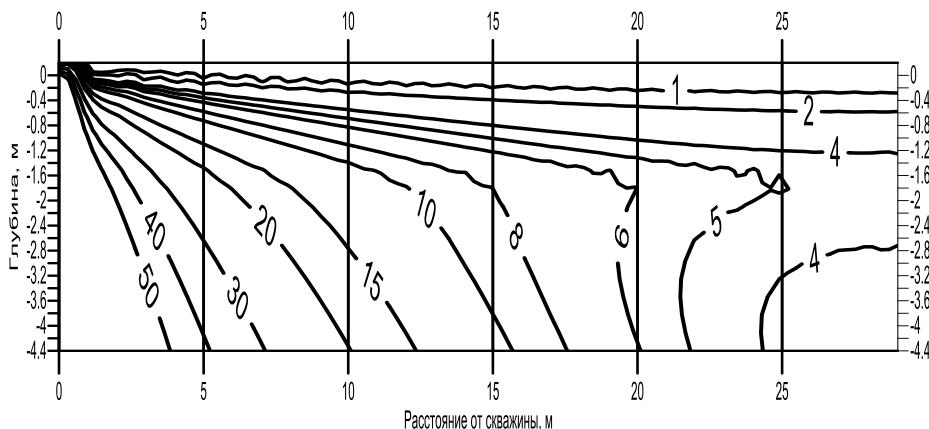
На рис.2 отображена профильная картина температурного поля одиночной эксплуатационной геотермальной скважины, построенная по результатам численного моделирования на момент времени  $t=5$  лет и при температуре на устье в 120°C (зимний период).



**Рис.2.** Среднемесячные январские температуры почвы на глубинах через 5 лет эксплуатации геотермальной скважины.  $T_{пл} = 120^\circ\text{C}$

Расчёты показывают, что тепловой поток «поверхность почвы – воздух» существенно меняется лишь в радиусе одного метра от устья скважины и не оказывает большого влияния на микроклимат окружающей среды, однако с глубиной превышение температуры над фоновой значительно возрастает. В зимний период, на глубине 0,4м прирост температуры на расстоянии 5м составляет 5,5°C (рис.3), достигая 10°C (рис.2), а на глубине 0,2м на расстоянии 10м

от добывающей скважины среднемесячная январская температура установится на отметке 5°C (рис.2).



**Рис.3.** Изолинии прироста среднемесячных январских температур через 5 лет эксплуатации геотермальной скважины.  $T_{пл.} = 100^{\circ}\text{C}$

В табл. 2 отражаются значения суммарных годовых температур (количество тепла, выражающееся суммой среднесуточных температур воздуха или почвы) на глубинах в естественных условиях ( $\sum T_0$ ) и расчётные значения суммарных годовых температур через 5 лет эксплуатации добывающей геотермальной скважины ( $\sum T_5$ ). Величины  $\sum T_5/\sum T_0$  показывают, во сколько раз выросла суммарная годовая температура на разных расстояниях от скважины и глубинах.

**Таблица 2.** Начальные суммарные годовые температуры и суммарные годовые температуры через 5 лет

		-0,2м	-0,4м	-0,8м	-1,2м	-1,6м
$\sum T_0$		6069	6005	5962	5963	5912
$\sum T_5$	R=1м	11773	16239	22641	26973	29997
$\sum T_5$	R=2м	8554	10922	15290	19014	22103
$\sum T_5$	R=5м	6972	7862	9683	11491	13235
$\sum T_5$	R=10м	6482	6888	7747	8627	9482
$\sum T_5/\sum T_0$	R=1м	<b>1,94</b>	<b>2,70</b>	<b>3,80</b>	<b>4,52</b>	<b>5,07</b>
$\sum T_5/\sum T_0$	R=2м	<b>1,41</b>	<b>1,82</b>	<b>2,56</b>	<b>3,19</b>	<b>3,74</b>
$\sum T_5/\sum T_0$	R=5м	<b>1,15</b>	<b>1,31</b>	<b>1,62</b>	<b>1,93</b>	<b>2,24</b>
$\sum T_5/\sum T_0$	R=10м	<b>1,07</b>	<b>1,15</b>	<b>1,30</b>	<b>1,45</b>	<b>1,60</b>

Рассмотрим, как воздействует рост температур в деятельном слое почвы на максимальные амплитуды колебания годовых температур почвы на глубинах.

Обозначим через  $K_0$  отношение максимальной естественной амплитуды колебания годовой температуры ( $Amp_0$ ) к среднегодовой температуре ( $Sred_0$ ), через  $K_5$  – аналогичное отношение через 5 лет эксплуатации скважины ( $Amp_5/Sred_5$ ), рассчитанное с учётом изменившегося температурного режима почвы. Величины  $K_0/K_5$  показывают во сколько раз уменьшаются амплитуды колебания температур через 5 лет эксплуатации по сравнению с естественными колебаниями температуры на глубинах (табл.3).

**Таблица 3.** Амплитуды колебания годовых температур в естественных условиях и через 5 лет эксплуатации геотермальной скважины.

T = 120°C								
Расст. от скв, м	Глубин а, м	Max5 год. темп. °C	Min5 год. темп. °C	Amp5	Sred5	K5 = Amp5 /Sred5	K0 = Amp0/S red0	K0/K5
				Max-Min °C	средн егод. °C			
R=1	-0,2	46,4	20,1	26,3	32,7	0,8	2	2,5
	-0,4	56,4	33,9	22,5	45,1	0,5	1,8	3,6
	-0,8	70,9	54,4	16,5	62,9	0,26	1,5	5,8
	-1,2	80,9	68,8	12,2	74,9	0,16	1,2	7,5
	-1,6	87,9	78,9	9,1	83,3	0,11	1	9,1
R=2	-0,2	38,9	9,6	29,3	23,8	1,23	2	1,6
	-0,4	43,7	16,9	26,8	30,3	0,88	1,8	2,0
	-0,8	53,2	31,3	21,9	42,5	0,51	1,5	2,9
	-1,2	61,6	44,0	17,5	52,8	0,33	1,2	3,6
	-1,6	68,6	54,5	14,1	61,4	0,23	1,0	4,3
R=5	-0,2	35,0	4,7	30,3	19,4	1,56	2,0	1,3
	-0,4	36,1	7,6	28,5	21,8	1,31	1,8	1,4
	-0,8	39,2	14,4	24,8	26,9	0,92	1,5	1,6
	-1,2	42,6	21,4	21,3	31,9	0,67	1,2	1,8
	-1,6	46,1	27,9	18,3	36,8	0,50	1,0	2,0
R=10	-0,2	33,7	3,4	30,2	18,0	1,68	2,0	1,2
	-0,4	33,5	5,1	28,4	19,1	1,49	1,8	1,2
	-0,8	33,9	9,2	24,8	21,5	1,15	1,5	1,3
	-1,2	34,9	13,4	21,5	24,0	0,90	1,2	1,3
	-1,6	36,0	17,3	18,7	26,3	0,71	1	1,4

Рассмотрим точку на расстоянии  $R=1$  м от скважины и на глубине 1,6 м. Максимальная естественная годовая амплитуда температуры ( $Amp_0$ ) на данной глубине равна  $17^\circ\text{C}$ , среднегодовая температура  $16,2^\circ\text{C}$  ( $Sred_0$ ), отношение  $K_0=1,05$ , т.е. естественная годовая амплитуда температуры примерно равна среднегодовой температуре. Через 5 лет значение максимальной годовой амплитуды температуры ( $Amp_5$ ) в этой же точке  $9,1^\circ\text{C}$ , а среднегодовая температура  $83,3^\circ\text{C}$  ( $Sred_5$ ), отношение  $K_5=0,11$ , т.е. годовая амплитуда почти в 9 раз меньше среднегодовой в рассматриваемой точке. Таким образом, с глубиной превышение температуры над фоновой возрастает, и амплитуды колебания температур нивелируются.

Выделим на рис.3 изолинию  $5^\circ\text{C}$ , чтобы определить радиусы теплового возмущения и оценить площади аномальных зон на глубинах от 0,2 м до 1,8 м. Размеры

площадей аномальных зон в приповерхностной зоне по слоям при возмущении в  $5^{\circ}$ , сведены в табл.4, где  $R$  – расстояние от скважины,  $S$  – площадь аномальной зоны. Площадь аномальной зоны с глубиной быстро возрастает:  $S_{1,6}/S_{0,2}=100$ . На поверхности радиус данного возмущения не превышает одного метра. Интенсивность теплового возмущения изменяется от  $100^{\circ}\text{C}$  на левой границе области до изолинии  $5^{\circ}\text{C}$  на графике (рис.3). Через 5 лет эксплуатации скважины, на поверхности почвы радиус теплового возмущения в  $1^{\circ}\text{C}$  достигнет 1) 5м при  $T_{пл} = 100^{\circ}\text{C}$ ; 2) 8м при  $T_{пл} = 120^{\circ}\text{C}$  и не превысит 10м при  $T_{пл} = 150^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 4.** Площади аномальных зон на глубинах при  $T_{пл.}=100^{\circ}\text{C}$  при возмущении в  $5^{\circ}$

Глубина, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,4	1,6	1,8
$R, \text{ м}$	2	5	7	10	13	16	18	21
$S, \text{ м}^2$	12,6	63,6	153,9	314,0	803,8	1017,4	1256	1384,7

Таким образом, объём тепловой аномалии в деятельном слое почвы, внутри которой температура повысилась более чем на  $5^{\circ}\text{C}$ , составляет порядка  $700\text{м}^3$ . Аналогичным образом можно рассчитать объёмы аномалий различной интенсивности. При увеличении количества добывающих скважин (Махачкалинский термоводозабор включает 32 скважины, в том числе 14 эксплуатационных [11]) и времени их эксплуатации, масштабы температурной аномалии геотермальной зоны значительно возрастают. Высокотемпературные поля, возникающие под воздействием многолетних изменений температуры, позволяют прогнозировать экологические риски для экосистемы в меняющихся условиях. В [6] утверждается, что «геотермальные экосистемы представляют собой идеальную платформу для проведения исследований в разных масштабах, которые помогут разобраться в сложных экологических реакциях на потепление», в том числе в исследованиях изменения климата. Сочетание естественных и искусственных экспериментальных методов исследования, а также модельных построений в геотермальных зонах (как с высокотемпературными, так и слаботермальными водами) может помочь выявить реакции на потепление в широком спектре пространства, времени и биологической сложности, а также сопоставить теорию с фактическими данными.

#### 4 Заключение

Многовариантные расчёты на основе решения задачи математического моделирования процесса теплопереноса в прискважинной зоне позволили сделать следующие выводы:

1) Вследствие избыточного поступления тепла от добывающих геотермальных скважин, меняется температурный режим почвы в приповерхностной части геосферы, в деятельном слое почвы формируются локальные тепловые аномалии.



2) Относительные амплитуды колебания суточных, сезонных и годовых температур в деятельном слое почвы в пределах радиуса влияния скважины с глубиной значительно уменьшаются по сравнению с фоновыми.

3) Тепловой поток «поверхность почвы – воздух» существенно возрастает лишь в радиусе одного метра от устья скважин, что не оказывает большого влияния на микроклимат в районе месторождения, однако площадь аномальной зоны с глубиной значительно возрастает.

4) Естественное испарение с зеркала грунтовых вод, которое при росте температур активизируется, может привести к снижению уровня грунтовых вод, повышая сухость почв и, как следствие, к техногенному опустыниванию территории в районе месторождения.

5) Экспериментальные и модельные исследования температурного режима геотермальных месторождений могут стать основой для изучения влияния глобального потепления на мировые экосистемы.

## Литература

1. Суздалева А.Л., Безносос В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.А. Оценка экологической безопасности геотермальной электростанции на основе идентификации ее экологических аспектов // *Малая энергетика*. 2010. №1-2. С.59-65.
2. H.Kristmannsdottir, H.Armannsson. Environmental aspects of geothermal energy utilization / *Geothermics* 32 (2003) 451-461.
3. Веселко А.Ю. Концептуальная модель воздействия эксплуатации геотермальных месторождений на окружающую среду // *Вестник СВФУ*. 2020. №4. С.6-10.
4. Niyazi Aksoy, Celalettin Şimşek, Orhan Gunduz. Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balçova, Turkey / *Journal of Contaminant Hydrology* Volume 103, Issues 1–2, 7 January 2009, Pages 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.08.006> Get rights and content
5. Ruth Shortall, Brynhildur Davidsdottir, Gudni Axelsson. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainable impacts and assessment frameworks / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015) 391-406
6. О'Горман, Э. Дж., Бенстед, Дж. П., Кросс, У. Ф., Фриберг, Н., Худ, Дж. М., Джонсон, П. В. и др. (2014). Изменение климата и геотермальные экосистемы: естественные лаборатории, сторожевые системы и убежища будущего. *Глобус. Изменение биологии*. 20, 3291-3299. doi: 10.1111/gcb.12602
7. Abdul Nishar, Martin K.-F. Bader, Eoin J.O'Gorman, Jieyu Deng, Barbara Breen, Sebastian Leuzinger. Temperature Effects on Biomass and Regeneration of Vegetation in a Geothermal Area / *Functional Plant Ecology* Volume 8 – 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00249>
8. Одум Ю. Экология: В 2-х т. Т.1. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. 328 с.
9. Ковда В.А. Проблемы опустынивания и засоления почв аридных регионов мира.- М.: Наука, 2008. – 415 с.
10. Розанов Б.Г., Зонн И.С. План действий по борьбе с опустыниванием в СССР: оценка, мониторинг, предупреждение и борьба с ним // *Проблемы освоения пустынь*. 1981, N 6, с.22-31.
11. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика. - М.: Физматлит, 2008. 375 с.

12. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. – М.: Наука, 2001. 260с.
13. <https://www.activestudy.info/zhiznennye-formy-stepnyx-rastenij/> © Зооинженерный факультет МСХА
14. Щербуль З.З. Влияние эксплуатации геотермальной скважины на активизацию теплообмена в приповерхностном слое Земли // Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала - 2015. - С. 20-25.
15. Щербуль З.З. Геотермальные скважины как искусственные источники теплового загрязнения окружающей среды // Сборник статей V международной научно-практической конференции «GEOENERGY-2022». Грозный - 2022.

### References

1. Suzdaleva, A.L.; Beznosov, V.N.; Kuchkina, M.A.; Suzdaleva, A.A. Assessment of ecological safety of a geothermal power plant based on the identification of its environmental aspects // *Malaya Energetika*. 2010. №1-2. P. 59-65.
2. H.Kristmannsdottir, H.Armannsson. Environmental aspects of geothermal energy utilization / *Geothermics* 32 (2003) 451-461.
3. Veselko A.Yu. Conceptual model of the impact of geothermal fields exploitation on the environment // *Vestnik SVFU*. 2020. №4. P.6-10.
4. Niyazi Aksoy, Celalettin Şimşek, Orhan Gunduz. Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balçova, Turkey / *Journal of Contaminant Hydrology* Volume 103, Issues 1–2, 7 January 2009, Pages 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.08.006> Get rights and content
5. Ruth Shortall, Brynhildur Davidsdottir, Gudni Axelsson. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainable impacts and assessment frameworks / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015) 391-406
6. O’Gorman, E. J., Benstead, J. P., Cross, W. F., Friberg, N., Hood, J. M., Johnson, P. W., et al. (2014). Climate change and geothermal ecosystems: natural laboratories, sentinel systems, and shelters of the future. *Globe. Changing Biology*. 20, 3291-3299. doi: 10.1111/gcb.12602
7. Abdul Nishar, Martin K.-F. Bader, Eoin J.O’Gorman, Jieyu Deng, Barbara Breen, Sebastian Leuzinger. Temperature Effects on Biomass and Regeneration of Vegetation in a Geothermal Area / *Functional Plant Ecology* Volume 8 – 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00249>
8. Odum Y. *Ecology*: Vol. 1. М.: Mir, 1986. 328 P.
9. Kovda V.A. *Problems of desertification and soil salinization in arid regions of the world*. - М.: Nauka, 2008. - 415 P.
10. Rozanov B.G., Zonn I.S. Action Plan to Combat Desertification in the USSR: assessment, monitoring, prevention and control // *Problems of Desert Development*. 1981, N 6, p.22-31.
11. Alkhasov A.B. *Geothermal Energy*. - М.: Fizmatlit, 2008. 375 PP.
12. Kurbanov M.K.. *Geothermal and hydro-mineral resources of the Eastern Caucasus and Pre-Caucasus*. - М.: Nauka, 2001. 260 PP.
13. <https://www.activestudy.info/zhiznennye-formy-stepnyx-rastenij/> © Zoengineering Faculty of IASA.

14. Shcherbul Z.Z. Influence of geothermal well operation on heat exchange activation in the Earth's surface layer // Proceedings of the IV-th International Conference “Renewable Energy: Problems and Prospects”. Makhachkala - 2015. - P. 20-25.
15. Scherbul Z.Z. Geothermal wells as artificial sources of thermal pollution of the environment // Collection of articles of the V International Scientific and Practical Conference “GEOENERGY-2022”. Grozny - 2022.

## **Thermal Pollution of the Active Soil Layer During the Operation of a Geothermal Field**

Zinaida Shcherbul

Institute of Geothermal and Renewable Energy Problems, the United Institute of High Temperatures of RAS, Makhachkala, Russia

E-mail: [ipgzina@rambler.ru](mailto:ipgzina@rambler.ru)

**Abstract.** This article describes regional features of the soil microclimate under conditions of increasing anthropogenic load associated with the operation of geothermal energy facilities. Due to excessive heat input from producing wells, the character of temperature distribution in downhole zones changes significantly. Local thermal anomalies appear in the active layer of soil, the process of formation of which is complicated by the impact of amplitudes of daily temperature variations penetrating to the depth of constant soil temperature. Model calculations show a significant decrease in the relative amplitudes of daily, seasonal and annual temperature fluctuations within the radius of influence of the well. The temperature at the soil surface increases significantly within a radius of one meter from the wellheads, which has little effect on the microclimate in the field area. However, the temperature rise over the background temperature increases rapidly with depth. Observations of the ecosystem response to soil warming during the operation of geothermal fields could serve as a foundation for future research into the impact of global warming on the environment.

**Keywords:** thermal pollution, geothermal field, active soil layer, environmental, ecological risks.