

2025
№4(28)

Окружающая среда и энергостудение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703
(Online)

Окружающая среда и энергосбережение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2025 №4(28)

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

Бабуринов 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, член-корреспондент 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. (KTH Royal Institute of Technology, Sweden).
Нефедова Людмила Вениаминовна (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Нигматуллин Роберт Искандерович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН (ИО РАН).
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@jees.ru
Официальный сайт журнала <http://jees.ru>

Окружающая среда и энергоснабжение. 2025 №4(28)

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 20.01.2026.

Издатель:

ООО "Глобализация и устойчивое развитие. Институт
энергетической стратегии"
125009, г. Москва, Дегтярный переулок, д. 9, офис 011.
Тел./факс: +7 (495) 229-4241 доб. 224.
E-mail: guies@guies.ru.

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

Учредитель: Соловьев Д.А.

© Редакция журнала

«Окружающая среда и энергоснабжение», 2026

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

Содержание

Андреев Т.И., Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В. Экологический потенциал переработки отходов животноводства в регионах Российской Федерации	4
Бутузов В.А., Дрига Н.Ф. СЭС Краснодарского края: опыт эксплуатации гибридных станций.	24
Гулев С.К., Соловьев Д.А. Энергетика и климатические пороговые состояния (tipping points) океанской системы: риски и неопределённости для XXI века.....	39
Дегтярев К.С., Нефедова Л.В., Березкин М.Ю. Обзор проблем водообеспечения в засушливых регионах Юга России и возможной роли возобновляемой энергетики в их решении...67	
Ковалева Е.Д., Березкин В.Ю. Разработка трекера для системы двигателя Стирлинга с оптической фокусировкой на базе Arduino.....	92
Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Критерии и показатели оценки экологического риска АЭС.	100
Марченко О.В., Соломин С.В. Оценка стоимости водорода при использовании фотоэлектрических и ветроэлектрических установок для условий Дагестана.	111
Ткаченко Н.С. Вертикальное распределение тяжёлых металлов (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) в дерново-подзолистых почвах речной долины (на примере р. Каньрка)	123
Федорова Е.В., Федоров В.М. Особенности годового хода инсоляции и гидрологического режима рек и родников Горного Крыма.....	135

Content

Andreenko T.I., Rafikova Yu.Yu., Kiseleva S.V. Environmental potential of waste recycling in the regions of the Russian Federation.....	4
Butuzov V.A., Driga N.F. Photovoltaic power plants (PPPs) of Krasnodar territory: experience in operating the hybrid plants.....	24
Gulev S.K., Solovyyev D.A. Energy and Climate Tipping Points of the Ocean System: Risks and Uncertainties for the 21st Century.....	39
Degtyarev K.S., Nefedova L.V., Berezkin M.Yu. Review of water supply problems in the arid regions of Southern Russia and the possible role of renewable energy in their solution.....	67
Kovaleva E.D., Berezkin M.Yu. Development of a tracker for an Arduino-based Stirling optical focusing engine system.	92
Kryshev I.I., Sazykina T.G. Criteria and indexes for assessing environmental risk from nuclear power plants.	100
Marchenko O.V., Solomin S.V. Assessment of the hydrogen costs using photovoltaic and wind turbines for the conditions of Dagestan.....	111
Tkachenko N.S. Vertical distribution of heavy metals (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) in sod-podzolic soils of a river valley (on the example of Kanyrka river)	123
Fedorova E.V., Fedorov V.M. Features of insolation annual course and hydrological regime of Mountainous Crimea's rivers and springs	135

УДК 62-665.9

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-4-23

EDN: AOYHNDN

Экологический потенциал переработки отходов животноводства в регионах Российской Федерации

^{1,2}Андреевская Татьяна Ивановна [0000-0001-8678-3568],^{1,3}Рафикова Юлия Юрьевна [0000-0003-3204-9135],^{1,4}Киселева Софья Валентиновна [0000-0001-5836-8615]

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

E-mail: ²tanyandr00@mail.ru, ³ju.rafikova@mail.ru,
⁴k_sophia_v@mail.ru

Аннотация.

Экономика России входит в пятёрку стран мира с наибольшей эмиссией парниковых газов (ПГ). Значительный вклад в эмиссию вносит деятельность агропромышленного комплекса и особенно животноводства, выбросы от которого составляют 75% эмиссии от всего сельского хозяйства РФ. Происходит это в первую очередь за счёт вкладов метана (CH₄) и оксида азота (N₂O) от энтеральной ферментации животных и разложения продуктов их жизнедеятельности (навоза).

В работе выполнены расчёты выбросов метана, прямых и косвенных выбросов закиси азота от систем переработки навоза свиней в соответствии с методическими подходами МГЭИК (2006 г.) по уровню 2 с использованием национальных значений коэффициентов из Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2020 гг., 1990–2021 гг., 1990–2022 гг. и 1990–2023 гг.

Результаты расчётов удельных выбросов парниковых газов от систем переработки навоза свиней показывают, что с 2020 по 2023 гг. удельные выбросы ПГ от продуктов жизнедеятельности животных уменьшились в среднем по стране на 10,3%. В то же время, за счёт увеличения поголовья свиней за эти годы выбросы ПГ от навоза уменьшились лишь на 1,9%, что определяет необходимость дальнейшего поиска путей снижения выбросов ПГ от систем обращения с навозом.

В соответствии с Федеральным законом № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» в России разработана и реализуется система

оценки выбросов парниковых газов, предусматривает обязательную отчетность для крупных компаний (более 50 тыс. т CO₂-экв./год выбросов ПГ). Проведенные расчёты показывают, что выбросы парниковых газов при существующем распределении систем обращения с навозом свиней, достигают порогового значения в 50 тыс. т CO₂-экв./год на свиноводческих предприятиях с поголовьем скота более 260,5 тыс. животных.

Проведена оценка выбросов ПГ от систем обращения с навозом свиней для Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей на муниципальном уровне субъектов, что позволило выделить районы с наиболее мощными свиноводческими комплексами и, соответственно, с большими выбросами ПГ. Рассчитан потенциально возможный объем биогаза от побочных продуктов свиноводства для всех муниципальных образований Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей. Согласно проведенным оценкам, использование биогаза из отходов свиноводства вместо применяемого в настоящее время углеводородного топлива (сжиженного природного газа, природного газа, дизельного топлива, брикетированного бурого угля и топочного мазута) может привести к значительному сокращению выбросов ПГ. В Ленинградской области это сокращение может составить от 0,7 тыс. т CO₂/год (при замещении газового топлива) до 19 тыс. т CO₂/год (при замене брикетированного бурого угля); в Липецкой области – от 2,8 до 81,6 тыс. т CO₂/год; в Кемеровской области – от 1,2 тыс. т CO₂/год до 28,2 тыс. т CO₂/год (при замене тех же видов топлива). Полученные оценки выбросов парниковых газов могут быть использованы для обоснования методов обращения с отходами животноводства и развитию оптимизированного сельского хозяйства.

Ключевые слова: парниковые газы, эмиссия метана, свиноводство биогаз, обращение с отходами.

1 Введение

Анализ климатических тенденций последнего десятилетия показывает, что рост средней глобальной температуры воздуха сохраняется. В связи с тем, что одной из причин глобальных климатических изменений рассматриваются выбросы парниковых газов, велико внимание – как в научном сообществе, так и в международном дискурсе – к ограничению эмиссии углекислого газа, метана, закиси азота и иных газов, оказывающих парниковый эффект в атмосфере. В период с 1990 по 2024 гг. эти выбросы выросли почти на две трети, достигнув в 2024 г. около 58 млрд. т при том, что в Парижском соглашении в качестве вызывающего озабоченность прогноза на 2030 г. указывался объем 55 млрд.т/год. [1].

В ряде исследований [2; 3] была высказана гипотеза, согласно которой, повышения средней глобальной температуры воздуха не более 1,5°C можно достигнуть только в случае выполнения следующих условий:

- все крупнейшие страны-эмитенты парниковых газов должны достичь климатической нейтральности в период 2050–2070 гг.;
- антропогенная эмиссия метана должна быть снижена на 30% к 2030 г.;

- необходимо реализовать обязательства стран по восстановлению лесов.

Однако, достижению этих целей препятствуют объективные трудности, в том числе связанные со значительными затратами на осуществление мер по ограничению выбросов [4]. Дальнейшие исследования показали, что при существующих темпах декарбонизации, как в экономически развитых странах, так и в развивающихся, невозможно выполнить принятые ими обязательства по достижению климатической нейтральности в 2050-2070 гг. – эта цель не может быть достигнута ранее конца текущего столетия. [5]. И если в развитых государствах и сообществах (США, ЕС и др.) были зафиксированы значительные успехи за последнее десятилетие, то в развивающихся странах (по понятным причинам) преимущественно наблюдается противоположный тренд – выбросы парниковых газов продолжают расти.

Топ-15 государств мира по объемам выбросов парниковых газов в 2023 году возглавляет Китай, где объем выбросов парниковых газов составил 15,9 Гт CO₂-экв./год — это 30,1% общемирового объема (53 Гт CO₂-экв./год). На втором месте, отставая от КНР примерно в 2,6 раза, идут США (6 Гт CO₂-экв./год), а на третьем - Индия с показателем 4,1 Гт CO₂-экв./год. В топ-5 также вошли страны Евросоюза с совокупным объемом выбросов 3,2 Гт CO₂-экв./год и Россия (2,7 Гт CO₂-экв./год). Следующие места в рейтинге занимают Бразилия (1,3 Гт CO₂-экв./год), Индонезия (1,2 Гт CO₂-экв./год), Япония (1 Гт CO₂-экв./год), Иран (1 Гт CO₂-экв./год) и Саудовская Аравия (0,8 Гт CO₂-экв./год). Наконец, объемы выбросов, занимающих в рейтинге 11-15 места, в Канаде, Мексике, Южной Корее, Турции и Австралии составляют «всего» 0,6-0,7 Гт CO₂-экв./год. [6]

Следует заметить, что, несмотря на то что Россия находится на 5-м месте в рейтинге стран по объему выбросов парниковых газов, показатель РФ значительно ниже, чем в странах-лидерах. Задача сокращения выбросов парниковых газов декларируется практически всеми странами мира, в том числе и Российской Федерацией, поскольку экономика России входит в пятерку стран с наибольшей эмиссией углекислого газа. [7]

Россия принимает активное участие в деятельности Рамочной конвенции ООН об изменении климата, последовательно подписав и ратифицировав все ее основные документы (за исключением Глобального обязательства по метану 2021 г.). Будучи участником Парижского соглашения, РФ подтверждает приверженность климатическим целям, о чём свидетельствует ряд стратегических документов федерального уровня, определяющих направление климатической политики нашей страны. К числу важнейших из них следует отнести Климатическую доктрину Российской Федерации (утверждена Распоряжением Президента РФ №861-рп от 17.12.2009 г.), в которой глобальные изменения климата признаются как серьезная угроза для благополучия населения и устойчивого развития. В 2021 году была утверждена Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утверждена Распоряжением Правительства РФ №3052-р от 29.10.2021 г.), цель которой – сокращение выбросов ПГ путем внедрения, тиражирования и масштабирования низко - и безуглеродных технологий, стимулирования использования вторичных энергоресурсов, изменения налоговой, таможенной и бюджетной политики, применения мер по

сохранению и увеличению поглощающей способности лесов и иных экосистем, поддержки технологий улавливания, использования и утилизации парниковых газов.

С 1 января 2023 года в России введена углеродная отчетность предприятий, согласно Федеральному закону № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Отчетность обязательна для предприятий с массой выбросов CO₂ свыше 150 тыс. т/год, а с 1 января 2025 года порог снизился до 50 тыс.т/год. В соответствии с этим документом, а также Указом Президента РФ от 06.08.2025 №547 "О сокращении выбросов парниковых газов", планируется обеспечить к 2035 году сокращение выбросов ПГ в России до 65-67% относительно уровня 1990 года, а к 2060 г. – достичь углеродной нейтральности своей экономики (т.е. суммарные выбросы парниковых газов будут равны суммарному их поглощению на территории страны биологическими и техногенными системами).

Значительный объем ПГ попадает в атмосферу в результате сельскохозяйственной деятельности. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) за 2022 год, доля выбросов агропродовольственных систем в мировых выбросах парниковых газов составляет 26% (16,2 Гт CO₂-экв./год), причем основные источники - это растениеводство (27%), землепользование (24%) и животноводство (30%). [8]

В России доля агро-промышленного комплекса (АПК) в национальных выбросах ПГ значительно ниже – около 5% или 102,3 млн. т CO₂-экв./год, что соответствует 43,7% уровня 1990 года (231 798 тыс. т CO₂-экв./год) [9]. В структуре выбросов ПГ российского АПК ключевая роль принадлежит животноводству и птицеводству; выбросы от этой отрасли сельскохозяйственного производства составляют 75% от общей эмиссии ПГ в АПК. На растениеводство и различные практики землепользования приходится 17%, на мясопереработку - 8%. [10]

Животноводство доминирует в общих выбросах парниковых газов, в первую очередь, за счет вкладов метана (CH₄) и закиси азота (N₂O), образующихся в результате энтеральной ферментации кормов и управления навозом. Энтеральная ферментация у жвачных животных — основной источник выбросов метана в животноводстве. Она является естественной частью пищеварительного процесса у животных: микроорганизмы в пищеварительном тракте или рубце разлагают и ферментируют пищу, производя метан в качестве побочного продукта. Подсчитано, что на этот процесс тратится от 2 до 12% энергии потребляемого корма. За последние годы опубликованы результаты большого количества исследований, которые улучшили понимание сложных процессов ферментации и метаногенеза в организме животных, а также средств, с помощью которых можно снизить эту выработку. Введение в рацион животных специальных кормовых добавок, которые подавляют активность метаногенных микроорганизмов в их пищеварительном тракте, способно сократить выбросы метана от одного животного на 30-60%. Продолжаются активные исследования способов снижения газообразования в организме животных при одновременном сохранении эффективности ферментации, процессов пищеварения и усвоения питательных веществ кормов животными, т.е. здоровой физиологии животного организма [11, 12, 13]). По данным Нацкадастра, в 2023 году в России выбросы CH₄ при внутренней ферментации

домашних животных составили 42 935,6 тыс. т CO_2 -экв./год, или 42,4% от общих выбросов ПГ в агросекторе.

В процессе сбора, хранения и использования навоза в окружающую среду выбрасываются три парниковых газа – углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O). Кроме того, образуется аммиак (NH_3), который не является ПГ, но относится к четвертому классу опасности. Выбросы углекислого газа происходят, в основном, в неуправляемых процессах (например, дыхание животных), а также от использования ископаемого топлива для обогрева помещений и в других технологических процессах (при содержании свиней эта доля в общих выбросах CO_2 составляет 13-37%; при содержании коров – 7% [14]). В общих антропогенных выбросах доля углекислого газа от сельскохозяйственного производства оценивается менее чем в 4%. Кроме того, в формировании парникового эффекта потенциал глобального потепления CO_2 в 28 раз меньше, чем у метана, и в 298 раз меньше, чем у закиси азота, поэтому его влиянием на климат при оценке вклада в глобальные выбросы технологий производства сельскохозяйственной продукции обычно пренебрегают. По данным Нацкадастра, в 2023 году вклад закиси азота (N_2O) в общие сельскохозяйственные выбросы в РФ составил (49,5%), вклад CH_4 – 49,5%, вклад CO_2 – около 1,0%.

Задачей данной работы является оценка объема выбросов метана, прямых и косвенных выбросов закиси азота от систем сбора и хранения навоза свиней, как важнейшего эмитента ПГ среди отраслей животноводства, в субъектах РФ на муниципальном уровне. Проведено сравнение объема выбросов ПГ, рассчитанного на основании усредненного распределения систем обращения с навозом, представленного в Нацкадастре [9], с оценками этого объема, полученными с использованием обновлённых данных по распределению систем сбора и хранения сельскохозяйственных отходов и с учетом природно-климатического зонирования. Кроме того, в исследовании были проведены расчеты потенциального объема биогаза из побочных продуктов свиноводства (навоза) и сокращения выбросов парниковых газов при замещении биогазом традиционного топлива в регионах РФ (Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей с детализацией до муниципального уровня).

2 Материалы и методы

Основой методики расчетов выбросов парниковых газов от отраслей животноводства являются статистические данные о поголовье скота, которые обобщаются в данных Федеральной службы государственной статистики (Росстат) в границах субъектов и муниципалитетов. Поголовье скота (численность животных) в муниципальных районах на конец года определялось по Базе данных показателей муниципальных образований Росстата [15]. Полученные значения были использованы для перевода данных о поголовье животных по состоянию на конец года в среднегодовое поголовье в соответствии с требованиями методических указаний IPCC (Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК) [16]. Поправочный переводной коэффициент для свиней составляет

1,013, согласно [9]. Учитывалась численность животных только производственного сектора, т.е. поголовье животных в хозяйствах всех категорий без учета хозяйств населения.

Расчёты выбросов метана, прямых и косвенных выбросов оксида азота проведены с использованием методических подходов МГЭИК (уравнения 10.23; 10.25; 10.26; 10.27) [16]. Оценка была выполнена по второму уровню сложности методики МГЭИК, т.е. использованы как национальные значения коэффициентов уравнений из Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2020 гг., 1990–2021 гг., 1990–2022 гг. и 1990–2023 гг. [9], так и коэффициенты, представленные по умолчанию в Руководящих принципах МГЭИК. Так для расчётов средневзвешенного значения выбросов ПГ по РФ от систем сбора и хранения навоза свиней использовались значения следующих коэффициентов из Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2020 гг., 1990–2021 гг., 1990–2022 гг. и 1990–2023 гг.:

- VS – выделение летучих веществ по сухому весу (кг/сут.);
- B_0 – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза свиней ($\text{м}^3 \text{CH}_4/\text{кг}$ выделенных VS);
- MCF – коэффициенты преобразования метана для каждой системы S сбора и хранения навоза и помета с учетом климатических условий региона (%);
- MS – доля навоза свиней, которая обрабатывается с использованием определенной системы S сбора и хранения навоза в заданном регионе (не имеет размерности);
- N_{ex} – среднегодовое выделение азота на одну голову скота в регионе – коэффициент экскрекции (кг N/животное/год).

Следующие коэффициенты были взяты из методики МГЭИК, таблицы 10.21; 10.22; 10.23 [16]:

- EF_3 – коэффициент для определения прямых выбросов N_2O от системы сбора и хранения навоза S в регионе (кг $\text{N}_2\text{O-N}/\text{кг N}$ в системе S);
- $\text{Frac}_{\text{газMS}}$ – доля азота в обработанном навозе свиней, которая улетучивается в виде NH_3 и NO_x в данной системе сбора и хранения навоза S, (%);
- EF_4 – коэффициент выбросов N_2O в результате осаждения азота из атмосферы на почву и водные поверхности (кг $\text{N}_2\text{O-N}/\text{кг}$ улетучившихся $\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_x\text{-N}$).

Для оценки климатической значимости парниковых газов в работе были использованы обновленные потенциалы глобального потепления в соответствии с Пятым оценочным докладом МГЭИК, которые составляют 28 и 298 для CH_4 и N_2O соответственно. [17]

Удельное образование биогаза и содержание метана в нем подсчитывались в кубических метрах на единицу массы сухого вещества, содержащегося в физиологических отходах животных. Использовались значения выхода биогаза для мезофильного режима сбраживания отходов после 10-20 дней ферментации. [18]

Выбросы ПГ (углекислого газа, метана и закиси азота) при стационарном сжигании биогаза и традиционных видов топлива рассчитывались с использованием коэффициентов выбросов, приведенных в [16].

3 Результаты и обсуждение

Проведение инвентаризации парниковых газов, а именно, расчеты объема выбросов различными отраслями хозяйства и поглощения ведется Российской Федерацией на национальном уровне с 2006 года, согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 1 марта 2006 г. №278-р (в настоящее время система оценки действует в редакции Распоряжения Правительства Российской Федерации от 15 мая 2017г. №930-р). Отчет о выбросах и поглощении ПГ на уровне государства формируется в виде Кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, который ежегодно составляется Росгидрометом и Институтом глобального климата и экологии имени академика Ю.А.Израэля. Кадастр в соответствии с требованиями МГЭИК предоставляется в комитет Рамочной конвенции ООН об изменении климата как подтверждение обязательств государства по регулированию выбросов ПГ и для оценки национальной климатической политики.

За последние 4 года в России создана правовая основа для развития и реализации системы оценки выбросов парниковых газов, базирующаяся на Федеральном законе №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Система предусматривает обязательную отчетность для крупных компаний (более 50 тыс. т CO₂-экв. выбросов ПГ в год) через геоинформационную систему «Энергоэффективность», использует методики Минприроды России (Приказ Минприроды России от 27.05.2022 №371 "Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов") для количественного определения объема выбросов ПГ в тоннах CO₂-эквивалента и включает как обязательные, так, и добровольные подходы, направленные на достижение климатических целей России к 2060 году. Количество организаций, которые имеют обязательства по отчетности, исчисляются тысячами, и среди них – значительное количество агропромышленных предприятий, специализирующихся на выращивании скота и птицы.

В Таблице 1 приведены результаты авторских расчётов удельных выбросов парниковых газов в свиноводстве за 2020–2023 гг. по методике МГЭИК с использованием национальных значений коэффициентов [9].

Оценки показывают, что при существующих системах обращения с навозом свиней и других параметрах, представленных в Кадастре выбросов парниковых газов 2023 года, выбросы парниковых газов достигают порогового значения в 50 тыс. т CO₂-экв./год на свиноводческих предприятиях с поголовьем скота более 260,5 тысяч животных. Это минимальное значение поголовья свиней для попадания предприятия в перечень организаций, регулируемых ФЗ-296. При этом, в соответствии с указанным законом, пока не учитываются косвенные выбросы ПГ

от используемого транспорта, систем локального отопления и механизации, которые также могут достигать значительных величин.

Таблица 1. Выбросы парниковых газов (CH_4 , N_2O - прямые и косвенные) от систем сбора и хранения свиного навоза от одного животного в среднем по РФ в соответствии с коэффициентами Национальных кадастров.

Последний год кадастра	Выбросы CH_4 (кг CH_4 /голова*год)/ (кг CO_2 -экв./год)	Прямые выбросы N_2O (кг N_2O /голова*год) / (кг CO_2 -экв./год)	Косвенные выбросы N_2O (кг N_2O /голова*год) / (кг CO_2 -экв./год)	Суммарные выбросы ПГ (кг CO_2 -экв./год)
2020	5,732 / 161	0,02670 / 8,0	0.152 / 45,3	214
2021	5.784 / 162	0,02513/ 7,5	0,152 / 45,3	214,8
2022	5.623 / 157	0,02508 / 7,5	0,151 / 44,9	209,4
2023	5.157 / 144	0,02285 / 6,8	0,138 /41,1	191,9

Результаты Таблицы 1 позволяют также сделать вывод, что за последние четыре года удельные выбросы парниковых газов в свиноводстве (от продуктов жизнедеятельности одного животного) уменьшились в среднем по стране на 10,3%. Анализ данных Нацкадастров за эти годы показывает, что произошло это за счет изменения ряда факторов: увеличения доли хранения навоза в жидком состоянии без образования естественной корки, уменьшения выделения летучего твердого вещества от продуктов жизнедеятельности свиней и уменьшения общего выделения азота от животного – коэффициента экскрекции.

За это же время выбросы ПГ от навоза всех свиней по стране уменьшились лишь на 1,9% (с 5 531 тыс. т в CO_2 -экв./год в 2020 году до 5 425 тыс. т CO_2 -экв./год в 2023 году, соответственно). Объясняется это увеличением поголовья свиней в РФ в рассмотренные годы (с 25,85 млн. голов в 2020 г. до 28,27 млн. – в 2023 г.), что определяет необходимость дальнейшего поиска путей снижения выбросов ПГ от систем обращения с навозом. [19]

Для уточнения расчетных коэффициентов методики инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации в ряде работ [20,

21] был проведен анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России. С учетом этих условий были выделены три зоны распределения технологий переработки навоза в РФ:

1-я — Северо-Западный федеральный округ (СЗФО);

2-я — Приволжский федеральный округ (ПФО), Южный федеральный округ (ЮФО), Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО), Центральный федеральный округ (ЦФО);

3-я — Уральский федеральный округ (УФО), Сибирский федеральный округ (СФО), Дальневосточный федеральный округ (ДФО).

На основе проведенного районирования территории РФ в [21] были представлены прогнозные уточненные распределения систем сбора и хранения навоза свиней в этих зонах с 2021 по 2025 гг.

Для выявления значимости проведенных уточнений в оценках общих выбросов ПГ нами был проведен расчёт выбросов парниковых газов от побочного продукта свиноводства (навоза) для трех субъектов РФ, расположенных в разных природно-климатических зонах – Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей. Сравнивались объемы выбросов ПГ, рассчитанные с использованием среднего по стране распределения технологий переработки навоза (Нацкадастр, 2023 г.) и уточненного распределения с учетом природно-климатических условий в [21]. Результаты сравнения эмиссии метана, прямых и косвенных выбросов закиси азота, рассчитанных с этими методическими различиями, представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Выбросы парниковых газов от систем обращения со свиным навозом для Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей в 2023 г., рассчитанные по данным Кадастра парниковых газов и уточненному распределению систем обращения с навозом для разных природно-климатических зон (по работе [21]).

Субъект РФ, метод рас- чета коэф- фициентов	Выбросы т CH ₄ /т CO ₂ - экв./год	т N ₂ O пря- мые/ т CO ₂ - экв./год	т N ₂ O кос- вен./ т CO ₂ - экв./год	Сумма вы- бросов в т CO ₂ - экв./год	Отклонения оценок, т CO ₂ -экв./год %
Ленинград- ская обл., Нацкадастр 2023 г.	895 / 25063	4 / 1182	24 / 7155	33399	
Ленинград- ская обл., зона I	865 / 24217	4,8 / 1430	24 / 7140	32787	612 1,8%
Липецкая обл., Нацкадастр 2023 г.	3928 / 109998	18 / 5180	105 / 31322	146500	
Липецкая обл., Зона II	4126 / 115530	12 / 3460	105 / 31425	150414	- 3914 - 2,6%

Субъект РФ, метод рас- чета коэф- фициентов	Выбросы т CH ₄ /т CO ₂ - экв./год	т N ₂ O пря- мые/ т CO ₂ - экв./год	т N ₂ O кос- вен./ т CO ₂ - экв./год	Сумма вы- бросов в т CO ₂ - экв./год	Отклонения оценок, т CO ₂ -экв./год %
Кемеров- ская обл., Нацкадастр 2023 г.	1732 / 48514	8 / 2287	46 / 13848	64649	
Кемеров- ская обл., зона III	1816 /50848	5 /1602	47 / 13889	66339	- 1690 - 2,5%

Как видно из Таблицы 2, величины выбросов парниковых газов, рассчитанные по уточненному распределению систем обращения с навозом, оказались более высокими для второй и третьей природно-климатических зон по сравнению с выбросами, полученными согласно методике Нацкадастра. Однако, эти различия невелики и в абсолютном выражении составляют не более 4 тыс. т CO₂-экв./год, или не более 3%. Столь незначительная разница в этом сравнении объясняется, возможно, тем, что хотя для разных природно-климатических зон и были обнаружены различия в технологиях обработки навоза, но для необходимости использования методики расчёта МГЭИК технологии были сведены к двум системам хранения навоза – «Жидкое» и «Сухое», что нивелирует уточнения распределения используемых технологий. Как выяснилось в ходе выполнения Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ), разнообразие применяемых на территории России технологий хранения и переработки побочных продуктов животноводства (и свиноводства, в частности) превосходит варианты, предлагаемые методикой МГЭИК, что диктует необходимость разработки национальных коэффициентов эмиссии ПГ [22].

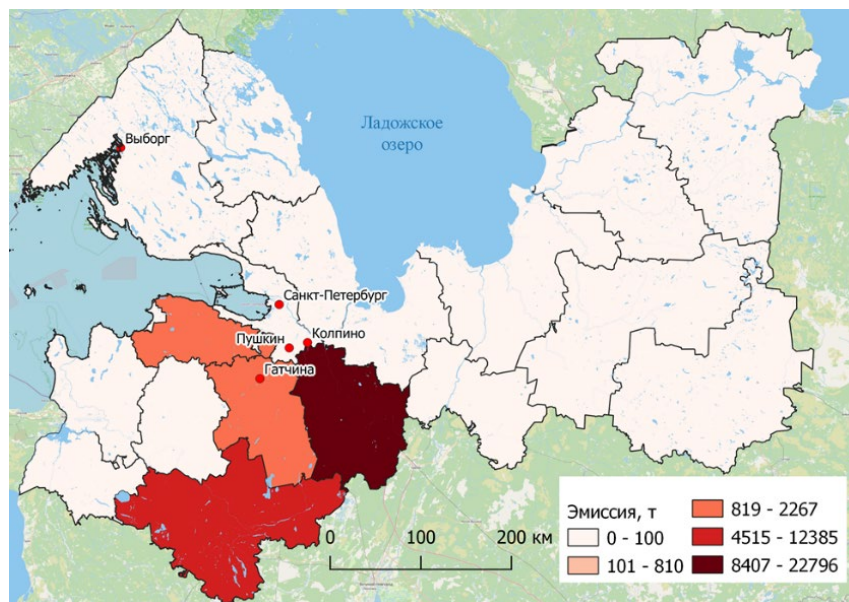
Учитывая незначительное различие величин выбросов, рассчитанных по этим двум системам распределения навоза, дальнейшие расчёты эмиссии ПГ в муниципальных образованиях Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областях были проведены по данным Нацкадастра за 2023 год. Расчёты позволили выделить в этих субъектах районы с наиболее мощными свиноводческими комплексами и, соответственно, с большими выбросами ПГ.

В Ленинградской области (рис. 1а) – это Тосненский муниципальный район (поголовье свиней 118 472, выбросы ПГ - 22,4 тыс. т CO₂-экв./год); Лужский район (41 351 свиней, 7,8 тыс. т CO₂-экв./год); Гатчинский район (8 392 свиней, 1,6 тыс. т CO₂-экв./год).

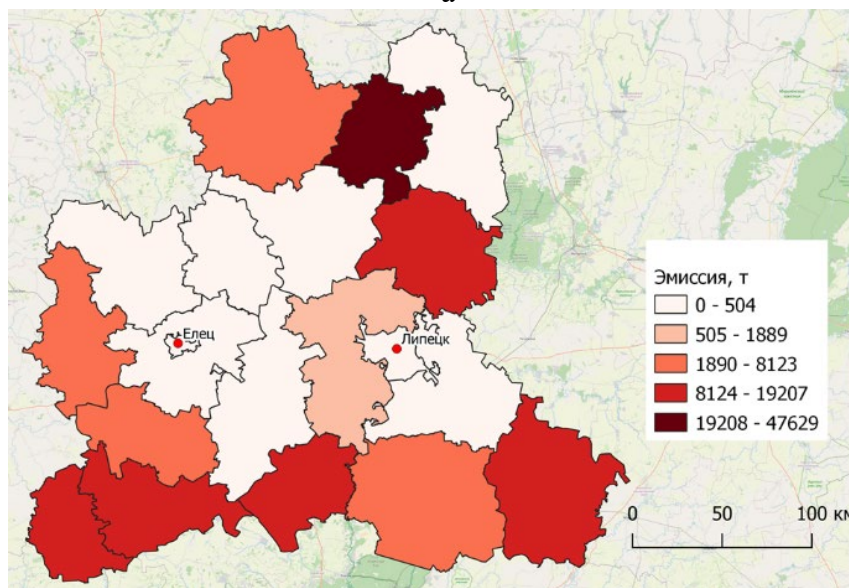
В Липецкой области (рис. 1б) свиноводство развито в Лев-Толстовском районе (поголовье 247 523, выбросы ПГ 47,7 тыс. т CO₂-экв./год), Добровском муниципальном районе (поголовье 98 785, выбросы 19,0 тыс. т CO₂-экв./год), Тербунском районе (97 365 голов, 18,8 тыс. т CO₂-экв./год).

В Кемеровской области (рис. 1в) лидерами по выращиванию свиней являются Новокузнецкий муниципальный округ (241 146 свиней, 47,6 тыс. т CO₂-экв./год);

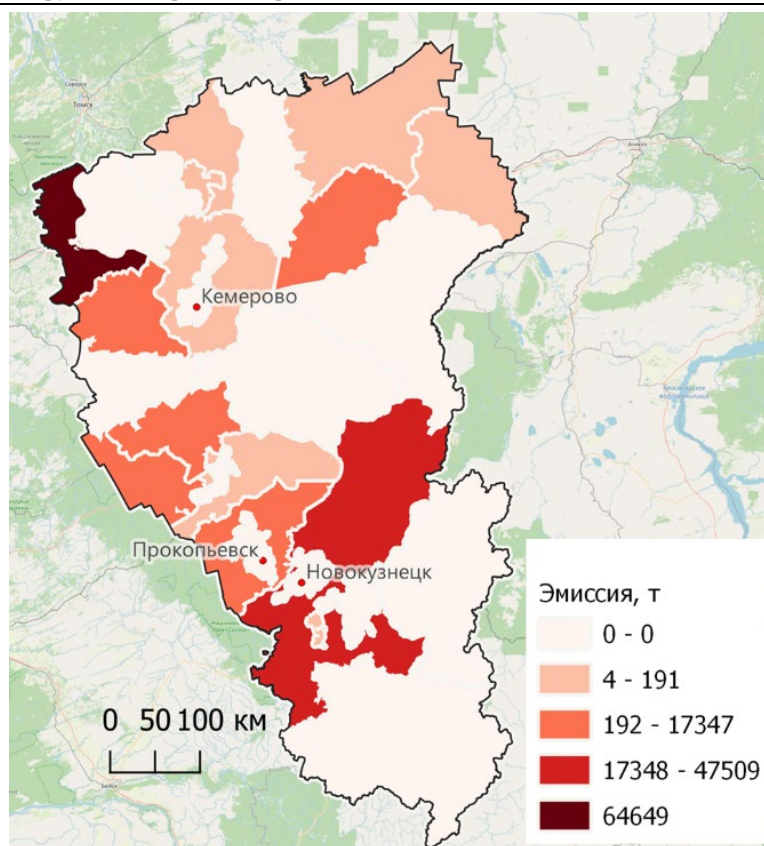
Прокопьевский муниципальный округ (80 633 свиней, 15,9 тыс. т CO₂-экв./год);
Топкинский муниципальный округ (3 066 свиней, 0,6 тыс. т CO₂-экв./год).



а



б



В

Рис. 1. Эмиссия парниковых газов от предприятий свиноводства в муниципальных образованиях Ленинградской (а), Липецкой (б), Кемеровской (в) областей. Показаны выбросы парниковых газов в т CO_2 -экв./год.

Одним из решений проблемы выбросов ПГ являются технологические инновации и, в частности, применение биогазовых технологий. Для Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей (на уровне муниципальных образований) по данным за 2024 г. рассчитан объем биогаза, который может быть получен из навоза свиней на свиноводческих предприятиях регионов. Рассчитано также количество традиционного топлива: топочного мазута, брикетированного бурого угля, дизельного топлива, сжиженного природного газа и природного газа, которые могут быть сэкономлены в результате замены его биогазом и использовании его как топлива при выработке электрической и тепловой энергии. По методике МГЭИК рассчитан потенциал сокращения выбросов парниковых газов (углекислого газа, метана и закиси азота) в результате возможного замещения биогазом этих традиционных видов топлива (Табл. 3).

Таблица 3. Биогаз из навоза свиней и возможная экономия традиционных видов топлива при замене их биогазом при сжигании, сокращение при этом выбросов ПГ

Субъект РФ	Биогаз (тыс. м ³ /год)/ Энергия биогаза (ГДж/год)	Брикети- ро- ванный. бурый уголь	Топ- поч- ный мазут	Ди- зель- ное. топ- ливо	Сжи- жен. при- род. газ	При- род. газ
Ленинградская обл. Топливо, которое может быть замещено биогазом (т)	18148/ 439149	33781	10816	10213	9716	13109
Сокращение выбросов ПГ (т CO ₂ -экв./год)		19023	10103	8653	4306	659
Липецкая обл. Топливо, которое может быть замещено биогазом (т)	77807/ 1882831	144833	46375	43787	41656	56204
Сокращение выбросов ПГ (т CO ₂ -экв./год)		81559	43314	37101	18461	2814
Кемеровская обл. Топливо, которое может быть замещено биогазом (т)	33844/ 818980	62998	20172	19046	18119	24447
Сокращение выбросов ПГ (т CO ₂ -экв./год)		35476	18841	16138	8030	1228

Пространственное распределение объемов образования биогаза с детализацией до муниципалитетов в Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областях представлены на рис. 2 а- в.

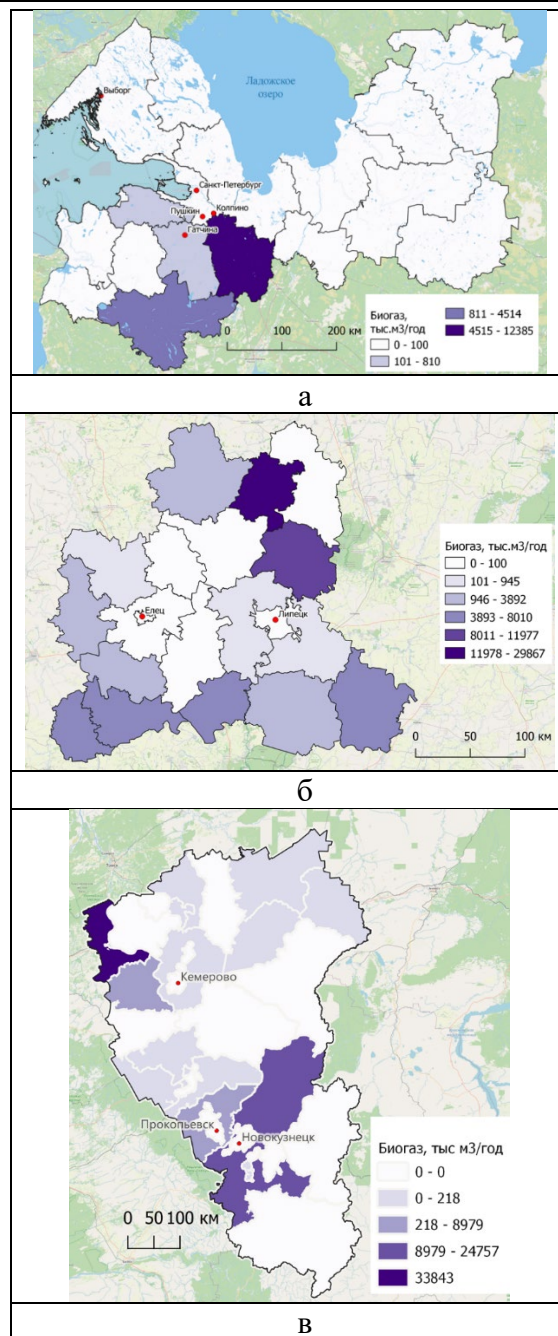


Рис. 2. Потенциальный объем образования биогаза из отходов свиноводства в муниципальных образованиях Ленинградской (а), Липецкой (б), Кемеровской (в) областей.

Рис. 3 иллюстрирует соотношение потенциального сокращения выбросов парниковых газов при замене биогазом различных видов углеводородного топлива. Диаграмма построена как с учетом объемов образования, так и физических свойств биогаза и различных типов топлива (теплотворная способность). Видно, что максимален потенциал замещения брикетированного бурого угля.

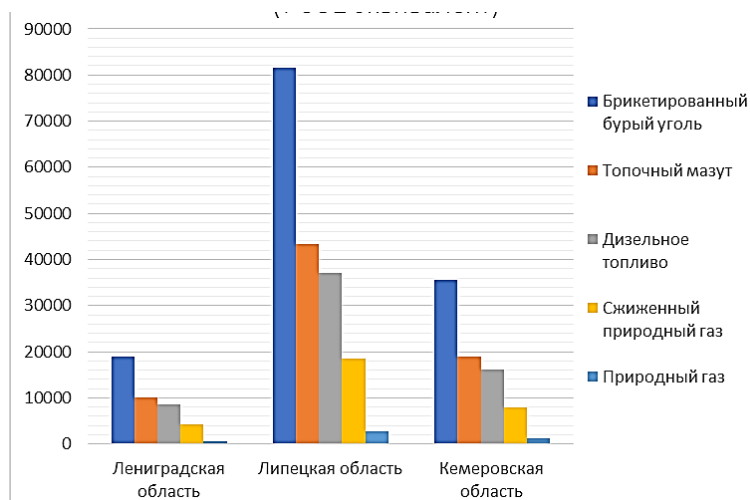


Рис. 3. Сокращение выбросов парниковых газов при использовании в качестве топлива для получения тепловой и электрической энергии биогаза из отходов свиноводства в Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областях РФ.

4 Заключение

1. Оценка объемов образования парниковых газов в животноводстве и потенциала их снижения имеет большое значение как для определения оптимальных методов обращения с отходами, так и внедрения технологий биоэнергетики в сельскохозяйственное производство. В связи с указанной задачей были рассчитаны объемы выбросов ПГ (метана, прямые и косвенные выбросы оксида азота) от систем сбора, хранения и использования навоза свиней, как важнейшего эмитента ПГ среди сельскохозяйственного животноводства, в субъектах РФ на муниципальном уровне. Расчёты выполнены в соответствии с Руководящими принципами национальных инвентаризаций парниковых газов [16], по второму уровню сложности с использованием национальных коэффициентов из Национальных докладов России о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2020 гг., 1990–2021 гг., 1990–2022гг. и 1990–2023 гг.

2. Проведено сравнение объемов выбросов, рассчитанных для среднестатистического распределения систем переработки навоза свиней, представленного в

Нацкадастре за 2023 год, и уточненного распределения этих систем с учетом природно-климатического зонирования РФ [20, 21] для свиноводства Ленинградской, Липецкой и Кемеровской областей на муниципальном уровне. Полученные результаты свидетельствуют о том, что объемы выбросов ПГ, рассчитанные по этим методикам, различаются не более, чем на 2,6%.

3. Муниципальный масштаб расчётов позволил выделить районы с объемом выбросов ПГ от свиноводческих предприятий близким к 50 тыс. т CO₂-экв./год – порогового значения, начиная с которого предприятие становится регулируемым и обязано ежегодно передавать отчетность о выбросах ПГ в Государственный реестр выбросов парниковых газов.

4. Сократить образование парниковых газов от отходов животноводства позволяет применение инновационных технологий их переработки и, в частности, биогазовых технологий. Согласно проведенным расчетам, использование биогаза из отходов свиноводства вместо применяемого в настоящее время углеводородного топлива (сжиженного природного газа, природного газа, дизельного топлива, брикетированного бурого угля и топочного мазута) может привести к значительному сокращению выбросов ПГ: в Ленинградской области это сокращение может составить от 0,7 тыс. т CO₂/год (при замещении газового топлива) до 19 тыс. т CO₂/год (при замене брикетированного бурого угля); в Липецкой области – от 2,8 до 81,6 тыс. т CO₂/год; в Кемеровской области – от 1,2 тыс. т CO₂/год до 28,2 тыс. т CO₂/год (при замене тех же видов топлива). Полученные оценки выбросов парниковых газов могут быть использованы для обоснования методов обращения с отходами животноводства и развитию оптимизированного сельского хозяйства.

Литература

1. Рушайло П. Парижские тайны климата // Ведомости (Устойчивое развитие). - 9 декабря 2025. - №3(10). - С.1-2.
2. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Глазго-2021: трудная дорога к цели в 1.5°C // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. - 2022. - Т. 505. - С. 50–56.
3. Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е., Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Известия РАН. Энергетика. – 2023. - № 2. - С. 3–15.
4. Березкин М. Ю., Дегтярев К. С., Синюгин О. А. Подходы к оценке инвестиционных затрат на глобальный энергетический переход // Окружающая среда и энергосодержание. - 2022. - № 1. - С. 4–14.
5. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Безуглеродный мир: возможно ли достижение глобальной климатической нейтральности // Теплоэнергетика. – 2024. - №12. - С. 3-16.
6. База данных EDGAR. [Электронный ресурс]. URL: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>. Дата обращения 20.12.2025.

7. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации №3052-р от 29 октября 2021 г.
8. Анализ деятельности и оценка выбросов парниковых газов крупнейших компаний агропромышленного комплекса России. Лаборатория устойчивых решений. КЕРТ. Ноябрь, 2025. 20 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://assets.kept.ru/upload/pdf/2025/11/ru-kept-ghg-emissions-in-agro.pdf>. Дата обращения 20.12.2025.
9. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2023 гг. Часть 1. М. 2025 г. 422 с.
10. Тананайко Е. Парниковый эффект vs сельское хозяйство. 24 ноября 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/column/evgeniy-tananayko/45210-parnikovyy-effekt-vs-selskoe-khozyaystvo/>. Дата обращения 20.12.2025.
11. Боголюбова Н.В., Зеленчикова А.А., Колесник Н.С., Лахонин П.Д.. Метанообразование в рубце и методы его снижения с использованием алиментарных факторов (Обзор) // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57. – №6. – С.1025-1054.
12. Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е. Определение выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней // АгроЭкоИнженерия. - 2023. - №4(117). - С.84-95.
13. Ильинов С.Б., Васенев И.И. Актуальные вызовы вариативного развития методологии агроэкологических климатических проектов, связанных с КРС // АгроЭкоИнфо. – 2025. №6.
14. Гриднев П.И., Гриднева Т.Т. Эмиссия парниковых газов и аммиака из навоза в процессе уборки и подготовки его к использованию // Вестник ВНИИМЖ. - 2017. - №1(25). - С. 25-33.
15. База данных показателей муниципальных образований. [Электронный ресурс]. URL: <https://gks.ru/dbscripts/munst/munst35/DBInet.cgi>. Дата обращения: 15.09.2025.
16. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. МГЭИК, 2006.
17. О климатической повестке в России. Первый ежегодный национальный доклад. Первый ежегодный национальный доклад о климатической повестке в России. М., 2025.
18. Веденев А.Г., Веденева Т.А., ОФ «Флюид» Биогазовые технологии. Бишкек, 2017. 95 с.
19. Текущая ситуация и перспективы развития животноводства в России. [Электронный ресурс]. URL: <https://заводы.рф/publication/zhivotnovodstvo-v-rossii>. Дата обращения: 20.12.2025.
20. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России // АгроЭкоИнженерия. - 2023. - №3(116). - С. 110-124.
21. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Прогнозное распределение технологий переработки свиного навоза и куриного помета в РФ для принятия мер по снижению выбросов парниковых газов // Аграрная наука. – 2024. – №384(7). С.160–165.
22. Романовская А.А. Результаты консорциума «Антропогенные выбросы: кадастр». Конференция "Национальная система мониторинга климатически активных веществ: итоги первого этапа ВИП ГЗ". [Электронный ресурс]. URL: <https://ecfor.ru/publication/monitoring-klimaticheski-aktivnyh-veshhestv-pervyj-etap/>. Дата обращения: 20.12.2025.

References

1. Rushajlo P. Parizhskie tajny klimata // Vedomosti (Ustojchivoe razvitie). 9 de-kabrya 2025. №3(10). S.1-2.
2. Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G. Glazgo-2021: trudnaya doroga k celi v 1.5°C // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki. 2022. T. 505. S. 50–56.
3. Klimenko A.V., Teryoshin A.G., Prun O.E., Perspektivy Rossii v snizhenii vybro-sov par-nikovyh gazov // Izvestiya RAN. Energetika. – 2023. № 2. S. 3–15.
4. Berezkin M. Yu., Degtyarev K. S., Sinyugin O. A. Podhody k ocenke investici-onnyh zatrat na global'nyj energeticheskij perekhod // Okruzhayushchaya sreda i energovede-nie. 2022. №1. S. 4–14.
5. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. Bezuglerodnyj mir: vozmozhno li dostizhenie global'noj klimaticheskoy nejtral'nosti // Teploenergetika. – 2024. №12. S. 3-16.
6. Baza dannyh EDGAR. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>. Data obrash-cheniya 20.12.2025.
7. Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybro-sov parnikovyh gazov do 2050 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravi-tel'stva Rossijskoj Federacii №3052-r ot 29 oktyabrya 2021 g.
8. Analiz deyatel'nosti i ocenka vybrosov parnikovyh gazov krupnejshih kompanij agropromysh-lennogo kompleksa Rossii. Laboratoriya ustojchivyh reshenij. KEPT. Noyabr', 2025. 20 s. [El-ektronnyj resurs]. URL: <https://assets.kept.ru/upload/pdf/2025/11/ru-kept-ghg-emissions-in-agro.pdf>. Data obrashcheniya 20.12.2025.
9. Nacional'nyj doklad o kadastro antropogennyh vybrosov parnikovyh gazov iz istochnikov i ih absorbcii poglotitelyami za 1990–2023 gg. Chast' 1. M. 2025 g. 422 s.
10. Tananajko E. Parnikovyj effekt vs sel'skoe hozyajstvo. 24 noyabrya 2025. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/column/evgeniy-tananayko/45210-parnikovyy-effekt-vs-selskoe-khozyaystvo/>. Data obrashcheniya 20.12.2025.
11. Bogolyubova N.V., Zelenchikova A.A., Kolesnik N.S., Lahonin P.D. Metanoobrazovanie v rubce i metody ego snizheniya s ispol'zovaniem alimentarnyh faktorov (Obzor) // Sel'sko-hozyajstvennaya biologiya. – 2022. – T. 57. №6. S.1025-1054.
12. Trifanov A.V., Bazykin V.I., Plaksin I.E. Opredelenie vybrosov metana ot enteral'noj fer-mentacii pri sodержanii svinej // AgroEkoInzheneriya. 2023. №4(117). S.84-95.
13. Il'yanov S.B., Vasenev I.I. Aktual'nye vyzovy variativnogo razvitiya metodologii agroekologicheskikh klimaticheskikh proektov, svyazannyh s KRS // AgroEkoInfo. – 2025. №6.
14. Gridnev P.I., Gridneva T.T. Emissiya parnikovyh gazov i ammiaka iz navoza v processe uborki i podgotovki ego k ispol'zovaniyu// Vestnik VNIIMZh. 2017. №1(25). S. 25-33.
15. Baza dannyh pokazatelej municipal'nyh obrazovaniy. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://gks.ru/dbscripts/munst/munst35/DBInet.cgi>. Data obrashcheniya: 15.09.2025.
16. Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov. MGEIK, 2006.
17. O klimaticheskoy povestke v Rossii. Pervyj ezhegodnyj nacional'nyj doklad. Pervyj ezhegod-nyj nacional'nyj doklad o klimaticheskoy povestke v Rossii. M., 2025.
18. Vedenev A.G., Vedeneva T.A., OF «Flyuid» Biogazovye tekhnologii. Bishkek, 2017. 95 s.

19. Tekushchaya situatsiya i perspektivy razvitiya zhivotnovodstva v Rossii. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://zavody.rf/publication/zhivotnovodstvo-v-rossii>. Data obrashcheniya: 20.12.2025.
20. Shalavina E.V., Vasil'ev E.V., Papushin E.A. Analiz tekhnologij pererabotki othodov zhivotnovodstva v razlichnyh prirodno-klimaticheskikh usloviyah Rossii // AgroEkoInzheneriya. 2023. №3(116). S. 110-124.
21. Bryuhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasil'ev E.V. Proгнозное raspredelenie tekhnologij pererabotki svinogo navoza i kurinogo pometa v RF dlya prinyatiya mer po snizheniyu vybrosov parnikovyykh gazov // Agrarnaya.nauka. – 2024. – №384(7). S.160–165.
22. Romanovskaya A.A. Rezul'taty konsorciuma «Antropogennyye vybrosy: kadastr». Konferenciya "Natsional'naya sistema monitoringa klimaticheskikh aktivnykh veshchestv: itogi pervogo etapa VIP GZ". [Elektronnyj resurs]. URL: <https://ecfor.ru/publication/monitoring-klimaticheskikh-aktivnykh-veshchestv-pervyj-etap/>. Data obrashcheniya: 20.12.2025.

Environmental potential of waste recycling in the regions of the Russian Federation

^{1,2}Tatiana Andreenko^[0000-0001-8678-3568],

^{1,3}Yulia Rafikova^[0000-0003-3204-9135],

^{1,4}Sofya Kiseleva^[0000-0001-5836-8615]

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ²tanyandr00@mail.ru, ³ju.rafikova@mail.ru,
⁴k_sophia_v@mail.ru

Abstract. The Russia is one of the five countries in the world with the highest greenhouse gas (GHG) emissions. A significant contribution to emissions is made by the activities of the agro-industrial complex and especially animal husbandry, the emissions from which account for 75% of emissions from the entire agriculture of the Russian Federation. This occurs primarily due to the contributions of methane (CH₄) and nitrogen oxide (N₂O) from enteral fermentation of animals and decomposition of their waste products (manure).

The work performed calculations of methane emissions, direct and indirect emissions of nitrous oxide from pig manure processing systems in accordance with the methodological approaches of the IPCC (2006) for level 2 using national coefficient values from National reports on the inventory of anthropogenic greenhouse gas emissions from sources and their absorption by sinks for 1990-2020, 1990-2021, 1990-2022 and 1990-2023

The results of calculations of specific greenhouse gas emissions from pig manure treatment systems show that from 2020 to 2023, specific GHG emissions from animal waste decreased by an average of 10.3% in the country. At the same time, due to an increase in the pig population, GHG emissions from manure have decreased by only 1.9% over the years, which determines the need for further search for ways to reduce GHG emissions from manure management systems.

In accordance with Federal Law No. 296-FZ "On Limiting Greenhouse Gas Emissions", a system for estimating greenhouse gas emissions has been developed and is being implemented in Russia, which provides for mandatory reporting for large companies (more than 50 thousand tons of CO₂-eq./year of GHG emissions). The calculations show that greenhouse gas emissions under the existing distribution of pig manure management systems reach a threshold of 50 thousand tons of CO₂-eq./year at pig-breeding enterprises with a livestock population of more than 260.5 thousand animals.

GHG emissions from pig manure management systems for the Leningrad, Lipetsk and Kemerovo regions were assessed at the municipal level of the subjects, which made it possible to identify areas with the most powerful pig breeding complexes and, accordingly, with large GHG emissions. The potential volume of biogas from pig dairy products has been calculated for all municipalities of the Leningrad, Lipetsk and Kemerovo regions. According to the estimates, the use of biogas from pig farming waste instead of currently used hydrocarbon fuels (liquefied natural gas, natural gas, diesel fuel, briquetted brown coal and heating oil) can lead to a significant reduction in GHG emissions. In the Leningrad region, this reduction can range from 0.7 thousand tons of CO₂/year (when replacing gas fuel) to 19 thousand tons of CO₂/year (when replacing briquetted brown coal); in the Lipetsk region – from 2.8 to 81.6 thousand tons of CO₂/year; in the Kemerovo region – from 1.2 thousand tons. tons of CO₂/year up to 28.2 thousand. t CO₂/year (when replacing the same types of fuel). The obtained estimates of greenhouse gas emissions can be used to justify methods of waste management of animal husbandry and the development of optimized agriculture.

Keywords: greenhouse gases, methane emissions, pig farming bio-gas, waste management.

УДК 620.92

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-24-38

EDN: EBSWBN

СЭС Краснодарского края: опыт эксплуатации гибридных станций

^{1,3}Бутузов Виталий Анатольевич [0000-0003-2347-9715],^{2,4}Дрига Николай Фёдорович¹Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия²ООО «Соларпрофит», г. Краснодар, Россия³E-mail: ets@nextmail.ru⁴E-mail: nick55@mail.ru

Аннотация. Представлены основные технические данные системных СЭС региона с пиковой мощностью до 57 МВт и ведущие организации региона по сооружению гибридных СЭС с общей установленной мощностью 37 МВт. Выполнен анализ технических решений и опыта эксплуатации 12 гибридных СЭС ООО «Соларпрофит» (Краснодар). Приведены суточные и месячные графики выработки отдельных потребителей СЭС, в том числе для микрогенерации мощностью до 15 кВт, с поставкой избытков электрической энергии в энергосистемы. Показано применение фотоэлектрических модулей ГК «Хевел», ведущих китайских производителей: Longi, Jinko Solar, с размещением в большинстве своем на кровлях зданий. Указаны значения удельной выработки электрической энергии 1200-1300 кВт·ч/кВт с ожидаемым сроком окупаемости СЭС от 3 до 5 лет.

Ключевые слова: солнечные электростанции, гибридные электростанции, Краснодарский край, фотоэлектрические модули, микрогенерация.

1 Введение

Краснодарский край является южным энергодефицитным регионом страны. В июле 2024 г. при историческом максимальном значении потребляемой мощности 6108 МВт были выполнены аварийные отключения потребителей на 283 МВт и

временные ограничения на 120 МВт (всего 393 МВт). В то же время в июле солнечные электростанции (СЭС) имели максимальные значения генерируемой мощности и участвовали в снижении энергодефицита региона.

Развитие отечественной сетевой солнечной энергетики осуществляется до 2035г по федеральной программе «ДПМ-ВИЭ-2.0» (ДПМ – договор предоставления мощности). В 2025 г. пиковая мощность эксплуатируемых в РФ сетевых СЭС составляла 2550 МВт, в том числе в Краснодарском крае 56,35 МВт. В таблице 1 представлены характеристики 8 сетевых СЭС региона с общей пиковой мощностью 174,35 МВт. Инвесторами, проектировщиками, монтажниками и эксплуатационниками указанных СЭС являлись организации ООО «Юнигрин Инжиниринг» (Москва).

В Краснодарском крае наряду с системными быстрыми темпами развивается также строительство распределенной солнечной энергетики с гибридными СЭС [1]. Как следует из таблицы 2, в этой области с 2007 г работают 5 основных организаций. Первая из них, ООО «Солнечный центр», является преемником фирмы «Солнечный ветер», генеральный директор которой к.т.н. М.Б. Закс в конце прошлого века впервые в СССР инициировал наземное применение ФЭМ ведущего производителя космических систем НПО «Сатурн» (Краснодар), организовал строительство завода мощностью до 5 МВт и положил начало применению СЭС на объектах региона.

Из пяти производителей СЭС ООО «Соларпрофит» отличается многолетнее сопровождение построенных объектов системой удаленного доступа, консультирование заказчиков, в том числе в вопросах поставки избытков электроэнергии в энергоснабжающие организации [2]. В таблице 3 представлены основные характеристики 12 гибридных СЭС этого производителя, построенных в 2020-2024 годах.

Таблица 1. Сетевые СЭС Краснодарского края и Адыгеи

№	Наименование	Пиковая мощность, МВт	Заказчик, владелец	Проектная организация / ген.подрядная организация / производитель ФЭМ	Состояние в 2025г
1	2	3	4	5	8
1	Лабинская	44,1	ООО «Возобновляемые источники энергии» (Лабинск)	ООО «ОйлГаз – проект» (Уфа) / ООО «Юнигрин Инжиниринг» (Москва) / ООО «АвеларСолар Технолоджи»	Эксплуатируется
2	Краснодарская ТЭЦ	2,35	ООО «Лукойл Кубань-энерго» (Краснодар)	ООО «ПКБ Энерго» / ООО «АвеларСолар Технолоджи» / ГК «Хевел» Россия	Эксплуатируется

№	Наименование	Пиковая мощность, МВт	Заказчик, владелец	Проектная организация / ген.подрядная организация / производитель ФЭМ	Состояние в 2025г
1	2	3	4	5	8
3	Адыгейская	4,0	ООО «Возобновляемые источники энергии» (Майкоп)	ООО «ОйлГаз – проект» (Уфа) / ООО «АвеларСолар Технолоджи» / ООО «Авелар Солар Технолоджи»	Эксплуатируется
4	Шовгеновская	4,9	ООО «Возобновляемые источники энергии» (Майкоп)	ООО «ОйлГаз – проект» (Уфа) / ООО «АвеларСолар Технолоджи» / ООО «Авелар Солар Технолоджи»	Эксплуатируется
5	Крыловская	1,0	ООО «Свет солнца» (Краснодар)	ООО «Электроинтелл» (Краснодар) / ГК «Хевел» Россия	Эксплуатируется
6	Северская	44,1	ООО «Возобновляемые источники энергии» (станция Северская)	ООО «Юнигрин Инжиниринг» (Москва) / ООО «Юнигрин Инжиниринг» / ООО «АвеларСолар Технолоджи»	Строится, до конца 2025г
7	Мостовская	44,1	ООО «Хевел Региональная генерация»	ООО «Юнигрин Инжиниринг» (Москва) / ООО «Юнигрин Инжиниринг» / ГК «Хевел» Россия	Проектируется
8	Армавирская	29,4	ГК «Хевел»	ООО «Юнигрин Инжиниринг» (Москва) / ООО «Юнигрин Инжиниринг» / ГК «Хевел» Россия и ООО «Авелар Солар Технолоджи»	Проектируется

Пиковая мощность 8 СЭС – 174,35 МВт, в том числе в эксплуатируемых – 5 СЭС (56,35 МВт), строящейся одной – 44,1 МВт, проектировалось две – 73,5 МВт.

Таблица 2. Основные производители гибридных СЭС Краснодарского края

Компания	ООО «Умная энергия»	ООО «Солар Центр»	ООО «Вист Энэрджи»	ООО «Соларпрофит»	ООО «Солнечный центр»
Сайт, адрес	https://clever-energy.ru/ , Краснодар, ул. Уральская, 114	https://msk.energy220.net/ , Краснодар ул. Василия Мачуги, 128	https://visten-ergy.ru/ , Краснодар, ул. Стасова, 182/1, оф. 310	https://solarprofit.ru/ , Краснодар, п. Индустриальный, ул. Победителей, 33	solarcentr.ru , Краснодар, ул. Атарбекова, 1
Руководитель	Коняев Д.А.	Попов А.В.	Гришин В.В.	Дрига Н.Ф.	Самородов И.Б.
Год основания	2016	2015	2014	2020	2007
Число ФЭС	550+	200	200	500	60
Число ФЭМ, тыс. шт.	42,0	28,5	20	14	6 типов
Установленная мощность, МВт	12,7	12,5	6	4,2	1,3
Специализация		сетевые – 85%, гибридные – 15%	сетевые – 95%, гибридные – 5%	сетевые – 88%, гибридные – 8%, автономные 3%	сетевые – 17%, гибридные – 27%, автономные 56%
Структура мощностей		до 15 кВт – 20%, до 60 кВт – 30%, до 120 кВт – 40%, >120 кВт – 10%	15-100 кВт – 85%, 100-900 кВт – 6,5%, >1МВт – 0,5%	до 15 кВт – 60%, 100-200 кВт – 40%	до 15 кВт – 67%, 20-110 кВт – 33%
Поставщики ФЭМ и инверторов	ФЭМ: Longi, Trina	ФЭМ: Luxen, Risun Инверторы: Kstar, Voltronic, Must	ФЭМ: Jinko Solar, Longi Инверторы: Fronius, Solax	ФЭМ: Longi, CW Energy (Турция), Хевел Инверторы: Deye, Fronius, Микро-арт	ФЭМ: Солнечный ветер, KV 150-270 ПАО «Квазар» (Киев), SOL 170-280, Eclips-Italia, PLM 200-280, Perlright Solar (КНР), Jinko Solar Инверторы: Outback Power (США), J.J. Solar (КНР), Tripp Lite (КНР), SMA Solar Technology AG (ФРГ), Deye (КНР), Stark Country (ФРГ-КНР)

Таблица 3. Основные характеристики гибридных СЭС ООО «Соларпрофит» в Краснодарском крае и Адыгее

Наименование, место расположения	Год строительства / Число ФЭМ (шт.) / Пиковая мощность кВт / Место размещения, ориентация, угол к горизонту / Тип инвертора	Сметная стоимость, тыс. руб.	Выработка электроэнергии в 2024г (годовой)		Удельная выработка кВт·ч/кВт в год	Ожидаемая окупаемость, лет
			тыс. кВт·ч	тыс. руб		
Зерносклад в станице Ясенской, Ейского района	2020 / 176 / 56,7 / кровля, южная, 20° к горизонту / Goodwe, 50 кВт	3400	74	888	1305	до 4 лет
Магазин сети "Пятёрочка" в п. Мостовском, Мостовского района	2021 / 98 / 56,7 / кровля, южная, 15° к горизонту - 50 шт.; кровля, западная, 10° к горизонту - 48 шт / Deye	3000	71	923	1246	до 4 лет
Птицефабрика в станице Ильинской Новопокровского района	2021 / 300 / 93 / кровля, южная, 10° к горизонту / Goodwe, 80 кВт	6300	93	1440	1290	до 5 лет
Офисно-складской комплекс на ул. Текстильной в г. Краснодаре	2022 / 50 кВт Хевел, 100 кВт Jinko Solar / 150 / кровля, по плоскости / Deye, 100 кВт+50 кВт	9500	187	2431	1240	до 5 лет
База отдыха «Элита» в станице Должанской, Ейского района	2022 / 98 / 51 / кровля, юго-западная, 10° к горизонту / Goodwe, 50 кВт	3263	67	588	1313	5 лет

Наименование, место расположения	Год строительства / Число ФЭМ (шт.) / Пиковая мощность кВт / Место размещения, ориентация, угол к горизонту / Тип инвертора	Сметная стоимость, тыс. руб.	Выработка электроэнергии в 2024г (годовой)		Удельная выработка кВт·ч/кВт в год	Ожидаемая окупаемость, лет
			тыс. кВт·ч	тыс. руб		
СТО "Таврус" в пос. Новомихайловский, Туапсинского района,	2022 / 36 модулей Хевел по 320 Вт / 11,3 / кровля, южная, 25° к горизонту / Deye, 10 кВт		139	1890	12300	4 года
Гостевой дом в г. Славянск-на-Кубани	2022 / 48 модулей Хевел по 320 Вт / 15,4 / кровля, южная, 15° к горизонту / Deye, 15 кВт					3 года
Офисно-складской комплекс по пер. Мирный в Краснодаре	2023 / 282 / 157 / кровля, юго-западная, 15° к горизонту / Deye, 100 кВт +50 кВт	9000	195	2184	1242	до 5 лет
Гостевой дом "Даховская Долина" в станице Даховской, Адыгея	2023 / 56 модулей Хевел по 320 Вт / 17,9 / кровля, восточно-западная, 15° к горизонту / Deye, 20 кВт		20	270	1117	3 года
Склад в станице Куцевская, Куцевского района	2023 / 48 модулей Хевел по 320 Вт / 15 / кровля, южная, 25° к горизонту / Deye, 15 кВт		17,25	224	1150	3 года

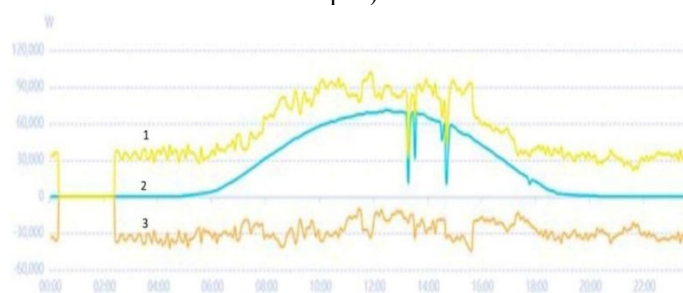
Наименование, место расположения	Год строительства / Число ФЭМ (шт.) / Пиковая мощность кВт / Место размещения, ориентация, угол к горизонту / Тип инвертора	Сметная стоимость, тыс. руб.	Выработка электроэнергии в 2024г (годовой)		Удельная выработка кВт·ч/кВт в год	Ожидаемая окупаемость, лет
			тыс. кВт·ч	тыс. руб		
Завод полиэтиленовых изделий, хутор Ленина, Краснодар	2024 / 120 / 51,6 / кровля, южная, 15° к горизонту / Deue, 100 кВт	3000	62	806	1201	до 4 лет
Швейная фабрика в станице Марьянской Славянского района	2024 / 72 / 31 / кровля, юго-западная 15° к горизонту / Deue, 50 кВт	1888	39	452	1258	3 года

2 Гибридные СЭС ООО «Соларпрофит»

Примером СЭС агропромышленных объектов является станция в станице Ильинской. На рис. 1 **СЭС птицефабрики в станице Ильинской Новопокровского района** пиковой мощностью 93 кВт с 300 ФЭМ ГК «Хевел», размещенных на южном скате здания под углом 10° к горизонту. На рис. 2 приведен суточный график работы СЭС 3.08.2024г. Днем нагрузка объекта увеличивается, а потребляемая мощность из сети снижается. На рис. 3 представлена структура энергопотребления объекта в июле 2024г. При общем месячном потреблении 42,7 МВт·ч СЭС выработала 15994 кВт·ч (37,5%), а за 2024г 74 тыс. кВт·ч стоимостью 888 тыс. руб. при тарифе 12 руб/кВт·ч. При сметной стоимости СЭС – 3400 тыс. руб., ожидаемый срок окупаемости составит до 4 лет.



Рис. 1. СЭС птицефабрики в станции Ильинской Новопокровского района (фото авторов)



1- общая мощность объекта, кВт, 2- мощность СЭС, 3- мощность, потребляемая из сети

Рис. 2. Суточный график работы Ильинской СЭС 3.08.2024г (данные авторов)

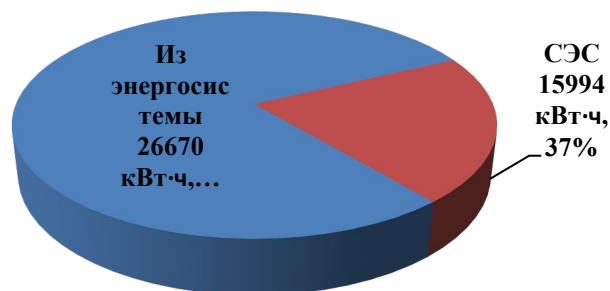


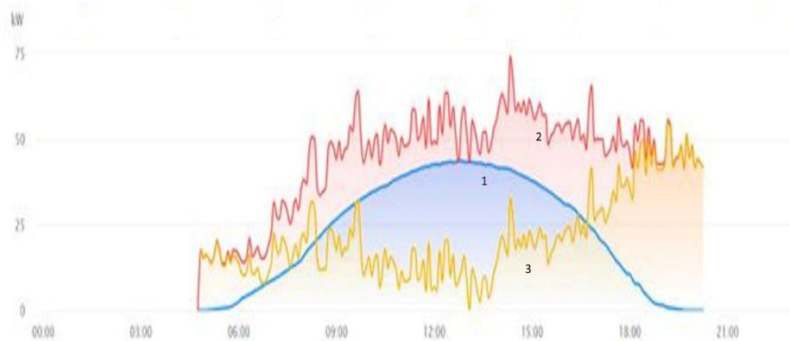
Рис. 3. Структура энергопотребления Ильинской птицефабрики в июле 2024 г., всего 42700 кВт·ч (100%) (данные авторов)

Станция магазина сети «Пятерочка» в пос. Мостовском (рис. 4) с суммарной пиковой мощностью 57 кВт состоит из 98 ФЭМ ГК «Хевел» с южной ориентацией, в том числе 50 ФЭМ под углом 15° к горизонту и 48 западной ориентации

под углом 10° к горизонту. На этом объекте были сопоставлены варианты различной ориентации и углов наклона ФЭМ. Существенной разницы в результатах выработки не установлено. На рис. 5 представлен график работы 29.07.2024г. При работающей СЭС потребитель значительно снижает потребляемую мощность из энергосистемы. На рис. 6 приведен график работы СЭС 2.06.2024г с превышением выработанной мощности над потребностями объекта, который был оформлен как микрогенерация. За июль при общем энергопотреблении объекта 21,1 МВт·ч СЭС было выработано 9400 кВт·ч, что обеспечило 44,3% собственного энергопотребления. Суммарная выработка энергии за 2024 год составила 71 тыс. кВт·ч стоимостью 923 тыс. руб. при тарифе 13 руб/кВт·ч. При сметной стоимости СЭС 3000 тыс. руб. ожидаемая окупаемость составляет 3 года.



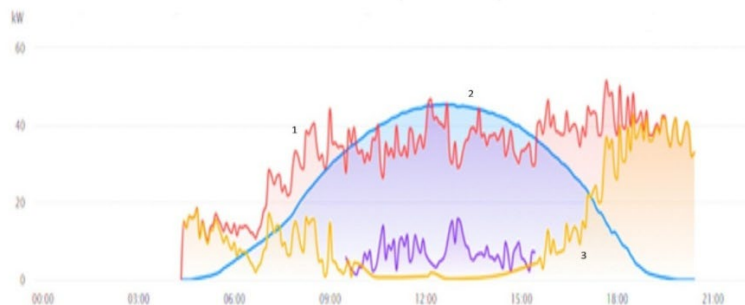
Рис.6. СЭС магазина сети «Пятерочка» в пос. Мостовском Мостовского района (фото авторов)



1- мощность СЭС, 2 потребляемая мощность объекта, 3 – поставка из сети

Рис. 5. Суточный график работы Мостовской СЭС 29.07.2024 г.

(данные авторов)



1 –

общая потребляемая мощность объекта, 2 – мощность СЭС, 3 – мощность из сети

Рис. 6. Суточный график работы Мостовской СЭС 2.06.2024 г.
(данные авторов)

В 2022г была построена СЭС **офисно-складского комплекса по ул. Текстильной в г. Краснодаре** ООО «Южград» пиковой мощностью 150 кВт (рис. 7) в составе ФЭМ ГК «Хевел» (50 кВт) и Jinko Solar, Китай (100 кВт). ФЭМ размещены по плоскости кровли здания. Каждая группа ФЭМ имеет отдельные инверторы фирмы Deye (Китай). На рис. 8 приведен суточный график работы ФЭМ, подключенных к инвертору 100 кВт 29.07.2024г. Нагрузка потребителя днем увеличивается в разы, а мощность из сети практически не увеличивается. За июль 2024г СЭС выработала 8,7 МВт·ч (100%), в том числе на собственное потребление 8,6 МВт·ч (98%) и выдала в энергосистему 133 кВт·ч (2%). При общем энергопотреблении объекта 20,5 МВт·ч (100%) выработка СЭС составила почти половину – 42%. Сметная стоимость СЭС 9500 тыс. руб., выработка за 2024г электроэнергии – 187 тыс. кВт·ч стоимостью 2430 тыс. руб. Ожидаемый срок окупаемости - 5 лет.

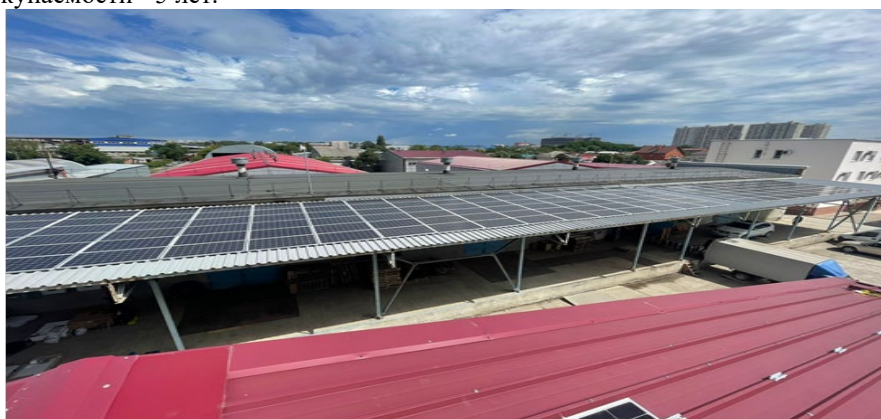


Рис. 7. СЭС по ул. Текстильной в Краснодаре (фото авторов)



1- мощность СЭС, 2 – общая мощность объекта, 3 – потребление из сети

Рис. 8. Суточный график работы СЭС на Текстильной в Краснодаре 29.07.2024г (данные авторов)

Второй СЭС, построенной в 2022 г., была станция **Базы отдыха в станице Должанской Ейского района** с пиковой мощностью 51 кВт (98 ФЭМ ГК «Хевел») – рис. 9. ФЭМ размещены на юго-западном скате кровли здания под углом 10° к горизонту. На рис. 10 приведен суточный график работы СЭС 3.08.2024г, а на рис. 11 – 10.05.2024г показана продажа избытков электроэнергии в сеть (объект микрогенерации оформлен). За июль СЭС выработала 9210 кВт·ч энергии и обеспечила 60% потребления объекта. В 2024г станция выработала 67 тыс. кВт·ч при тарифе 12 руб/кВт·ч, стоимостью 588 тыс. руб. При сметной стоимости 6300 тыс. руб. ожидаемый срок окупаемости составил до 5 лет.



Рис. 9. СЭС Базы отдыха в станице Должанской Ейского района (фото авторов)



Рис. 10. Суточный график работы СЭС Базы отдыха в станице Должанской Ейского района, 3.08.2024 г. (данные авторов)

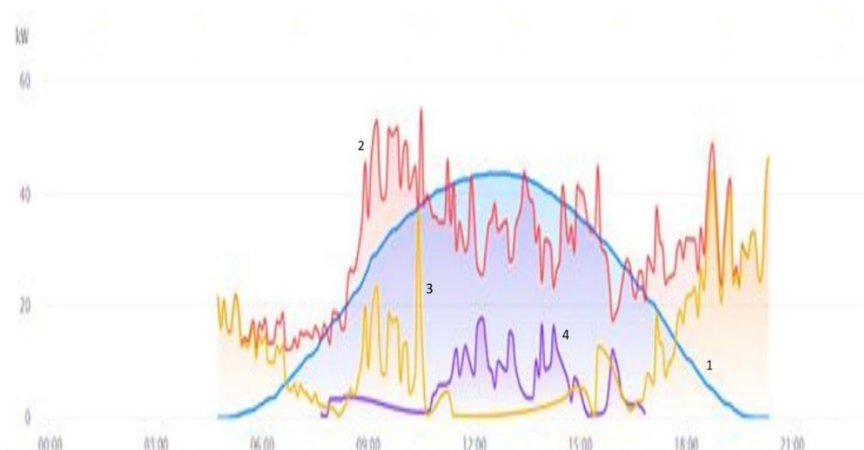


Рис. 11. Суточный график работы СЭС Базы отдыха в станице Должанской Ейского района, 10.05.2024 г. (данные авторов)

В 2024 г. ООО «Соларпрофит» была построена СЭС швейной фабрики в станице Марьянской Славянского района, с ФЭМ фирмы Longi (Китай). СЭС в **Марьянской** имеет пиковую мощность 31 кВт (72 ФЭМ), размещенных на юго-западном скате кровли здания под углом 15° к горизонту (рис. 12). В 2024 г. СЭС

было выработано 62 тыс. кВт·ч энергии стоимостью 452 тыс. руб. Сметная стоимость станции 1888 тыс. руб., ожидаемый срок окупаемости 3 года при тарифе 11,6 руб/кВт·ч.



Рис. 12. СЭС швейной фабрики в станице Марьянской Славянского района (фото авторов)

Как следует из вышеизложенного ООО «Соларпрофит» применяет как отечественные ФЭМ ГК «Хевел» суммарной мощностью – 357 кВт (51%), так и ведущих китайских производителей (Longi, Jinko Solar) – 340 кВт (49%). Наибольшей надежностью отличаются инверторы Deye (Китай). ФЭМ размещаются в основном на южных и юго-западных скатах кровель зданий под углом 10-25° к горизонту. Удельная выработка электрической энергии на кВт пиковой мощности составила 1200 – 1300 кВт·ч/кВт, ожидаемые сроки окупаемости от 3 до 5 лет. Весьма важным фактором является сопровождение эксплуатации системой удаленного доступа с момента ввода СЭС в эксплуатацию, нацеленность ООО «Соларпрофит» на получение заказчиком дополнительных средств при отпуске избытков электроэнергии в сети.

Руководителя ООО «Соларпрофит» отмечает активная политическая и общественная позиция. Результаты успешной эксплуатации СЭС используются для совершенствования законов о микрогенерации, об энергосбережении и других федеральных и региональных законов.

3 Выводы

Пятилетний опыт сооружения и эксплуатации 12 гибридных СЭС в Краснодарском крае позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение отечественных ФЭМ (ГК «Хевел») и ведущих китайских производителей (Longi, Jinko Solar) позволяет обеспечить надежную многолетнюю работу СЭС. Из применяемых инверторов большую надежность показали приборы фирмы Deye (Китай).

2. При проектировании СЭС следует анализировать суточные графики потребления электрической энергии в течение года, в том числе июля, сопоставлять со значениями производительности СЭС, что позволяет обеспечить оптимальную мощность и отдачу избытков выработанной электрической энергии энергоснабжающей организации по закону о микрогенерации.

3. При сооружении СЭС с пиковой мощностью до 150 кВт существенного изменения производительности при вариантах ориентации и углов наклона к горизонту не установлено.

4. Срок окупаемости сооружения гибридных СЭС ООО «Соларпрофит» составляет от трёх до пяти лет с учетом продажи избытков выработанной электрической энергии в сеть.

Литература

1. Бутузов В.А., Григораш О.В., Гришин В.В. Солнечные мегаваттные сетевые и автономные электростанции предприятий Краснодарского края // Энергетическая политика. 2025. № 8. С. 74-88
2. Белов С.И., Дрига Н.Ф., Коняев Д.А. Микрогенерация и микросети в сельской местности для эффективной трансформации электроэнергетики // СОК (Сантехника, отопление, кондиционирование). 2025. № 3. С. 58-71

References

1. Butuzov V.A., Grigorash O.V., Grishin V.V. Photovoltaic megawatt grid and autonomous power plants of the Krasnodar territory's companies (in Russ.). *Energy Policy*, 2025, 8, 74-82.
2. Belov S.I., Driga N.F., Konyaev D.A. Micro-generation and micro-grids in a rural area for efficient transformation of power industry (in Russ.). *SOK (Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie)*, 2025, 3, 58-71.

Photovoltaic power plants (PPPs) of Krasnodar territory: experience in operating the hybrid plants

^{1,3}Vitaly Butuzov, ²Nikolay Driga

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

^{2,4}Solarprofit LLC, Krasnodar, Russia

³E-mail: ets@nextmail.ru

⁴E-mail: nick55@mail.ru

Abstract. The article presents the main technical data of the region's system photovoltaic power plants (PPPs) with a peak capacity of up to 57 MW and the region's leading companies for the construction of hybrid PPPs with a total installed capacity of 37 MW, and performs an analysis of technical solutions and operational experience of 12 hybrid PPPs by Solarprofit LLC (Krasnodar). It contains the daily and monthly schedules for the generation of individual PPP consumers, including for microgeneration with a capacity of up to 15 kW, with the supply of excess electric energy to the power system. There is also shown an application of photovoltaic modules by the Hevel Group of Companies, and the leading Chinese manufacturers: Longi, Jinko Solar, with placement for the most part on the roofs of buildings. The assessments indicate the values of the specific electric energy generation of 1200-1300 kWh/kW with an expected payback period of 3 to 5 years.

Key words: photovoltaic power plants, hybrid power plants, Krasnodar territory, photovoltaic modules, micro-generation.

УДК 519.2:551.46:551.508.8

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-39-66

EDN: HJIVUK

Энергетика и климатические пороговые состояния (tipping points) океанской системы: риски и неопределённости для XXI века

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

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

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

Аннотация. Статья посвящена системному анализу пороговых (tipping point) состояний океанической системы и их потенциальному влиянию на климатическую и энергетическую устойчивость в XXI веке. Рассматриваются физические механизмы формирования пороговых переходов в крупномасштабной океанической циркуляции, морском льде и биогеохимических циклах, а также их связь с изменением глобальных климатических условий. Особое внимание уделяется Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС), деградации арктического морского льда и пороговым эффектам кислотности и теплового содержания Мирового океана. На основе современных моделей (CMIP6, IAMs), сценарных подходов и методов раннего предупреждения рассматриваются риски для топливно-энергетического комплекса, включая изменение ветровых и тепловых ресурсов, рост уровня моря, повышение экстремальности погодных явлений и уязвимость инфраструктуры. Показано, что нелинейный характер отклика океанических подсистем способен вызывать масштабные эффекты для энергетической безопасности, геоэкономики и международной политики. Предложены направления адаптационных стратегий для энергетической политики России, включая развитие мониторинга, модернизацию инфраструктуры, интеграцию климатических факторов в стратегическое планирование и расширение международного сотрудничества. Работа подчёркивает необходимость междисциплинарного подхода к оценке климатических рисков и формированию устойчивой энергетической стратегии в условиях глобальных изменений.

Ключевые слова: океанические tipping points, климатические пороги, Атлантическая меридиональная циркуляция (АМОС), морской лёд Арктики, биогеохимические циклы океана, климатические риски, энергетическая

безопасность, климато-энергетическое моделирование, энергетическая политика, адаптация к климатическим изменениям, неопределённость климатических сценариев, инфраструктурные риски ТЭК.

1 Введение

В условиях стремительного изменения климата океанская система выступает не только хранилищем значительной части избыточной тепловой энергии Земли, но и потенциальным источником нелинейных пороговых (так называемых *tipping points*) изменений, которые способны оказывать существенное влияние на глобальные энергетические режимы и инфраструктуру топливно-энергетического комплекса. Океан поглощает порядка 90 % и более избыточного тепла, поступающего в климатическую систему вследствие антропогенного воздействия, что делает его центральным регулятором энергетического баланса планеты [1], [2]. В этой связи следует обратить внимание на то, что текущее состояние и изменчивость океана необходимо рассматривать не только сквозь призму климатической науки, но и как важный фактор энергетической политики и энергетической безопасности.

Исследования в области взаимодействия атмосфера–океан показывают, что процессы передачи тепла, массы и импульса между океаном и атмосферой контролируют как среднесрочные (десятилетние) изменения, так и экстремальные явления — штормы, циклоны, изменение волнения — что, в свою очередь, прямо связано с эксплуатацией морских ветровых и волновых энергетических установок, транспортной логистикой морских ресурсов и безопасностью морской инфраструктуры [3]–[5]. При этом накопленная к настоящему времени научная база знаний в этой области свидетельствует о возможности возникновения пороговых изменений циркуляционных систем океана, сопровождающихся резкими и необратимыми сдвигами в климатических режимах (например, Атлантическая меридиональная циркуляция (АМОС), [6]).

Наблюдается растущий интерес к междисциплинарной интеграции климатической и энергетической проблематики: на энергетическую систему влияют не только долгосрочные тренды, но и возможные «тёплые» сценарии, в которых активируется одно или несколько пороговых механизмов океанической системы. Практика современного стратегического и инвестиционного планирования ТЭК требует учёта именно таких низкопрецедентных, но высокорискованных сценариев. Между тем, критические пороги океанской циркуляции, ледовых систем и океанско-атмосферного обмена остаются окружены значительными неопределённостями по вероятности, времени реализации и масштабам воздействия. Ранее подчёркивалась необходимость оценки как накопленного теплового и динамического потенциала океана, так и его возможной реактивности на внешние возмущения [1], а также рассматривались потенциальные энергетические и морские риски, связанные с изменчивостью морской среды [7].

Цель данной статьи состоит в том, чтобы сделать ретроспективный обзор современного состояния знаний о ключевых tipping-points океанской системы, оценить их потенциальные последствия для энергетической инфраструктуры и политики в XXI веке, а также проанализировать неопределённости, связанные с такими переходами, с точки зрения стратегического планирования энергетики. В частности, в статье нами рассматриваются следующие задачи: (i) систематизация типов океанических пороговых состояний и механизмов их возникновения; (ii) анализ путей и масштабов влияния таких состояний на энергетику (включая возобновляемые источники, добычу, транспорт и энергобалансы регионов); (iii) оценка ключевых источников неопределённости и предложение направлений адаптационной политики и управления рисками для топливно-энергетического комплекса.

2 Основы взаимодействия «энергетика – климатическая система океана»

Выполнение адекватного анализа взаимодействия «энергетика – климатическая система океана» требует чёткого определения ключевых понятий и взаимосвязей, а также понимания их физико-математического базиса. В рассматриваемом контексте под «пороговым состоянием» (англ. tipping-point) системы понимается такой уровень воздействия (возмущения, антропогенного воздействия, изменения внешних параметров), при котором система переходит из одного устойчивого состояния в другое с нелинейной, часто необратимой реакцией. В климатологии такие состояния обозначают как «критические пороги», сопровождаемые гистерезисом и потенциально необратимостью [8], [9].

Понятие устойчивости можно формализовать через модель динамической системы:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, \mu),$$

где X – вектор состояния системы (например, поток массы/теплоты океана, солёность, температура), а μ – параметр внешнего воздействия (например, тепловой поток, поступление пресной воды).

При определённом значении μ_{crit} наблюдается бифуркация [10]. Если X продолжает изменяться с малым увеличением μ , но затем достигается точка, после которой $dX/d\mu$ резко увеличивается либо система переходит в новый режим — это и есть tipping-point.

В прикладной гидро- и океанологии значительное внимание традиционно уделяется крупномасштабным нелинейным процессам, таким как Атлантическая меридиональная циркуляция (АМОС), морской лёд, биогеохимические насосы океанов. Например, рассматривается простое упрощение для АМОС:

$$\frac{dM}{dt} = F(T, S) - \lambda M,$$

где M – меридиональный перенос массы/теплоты; $F(T, S)$ – плотностной приводящий поток, зависящий от температуры T и солёности S ; λ – коэффициент обратной связи. При уменьшении F или увеличении λ система может выйти из устойчивого режима и перейти в слабое состояние (снижение M) [4, 5].

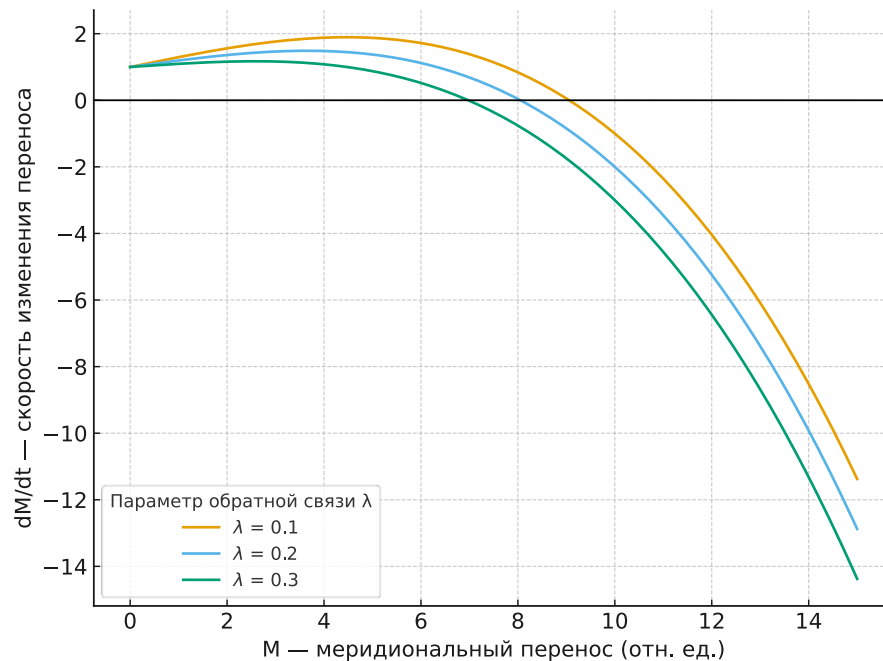


Рис. 1. Стационарные состояния и устойчивость АМОС (упрощённая нелинейная модель)

На графике Рис.1. показаны стационарные состояния упрощённой модели Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС). Пересечения кривых с осью $dM/dt = 0$ соответствуют равновесным режимам переноса. При увеличении коэффициента обратной связи λ система теряет устойчивость: устойчивое состояние (правое пересечение, оранжевая кривая) исчезает, и циркуляция переходит в слабый режим (зеленая кривая). Это иллюстрирует возможность порогового перехода (tipping point) при изменении динамического баланса между приводящим потоком $F(T, S)$ и затухающим влиянием обратной связи.

Термин «энергетика» в данной статье трактуется как комплекс процессов производства, передачи и потребления энергии (включая традиционный ТЭК и ВИЭ), а также инфраструктурной, логистической и инвестиционной составляющих. Под «энергетическим риском» понимается вероятность возникновения не-

благоприятного воздействия климато-океанических изменений на работу энергетической системы: снижение выработки, повышение затрат, повреждение инфраструктуры и/или нарушение цепочек поставок.

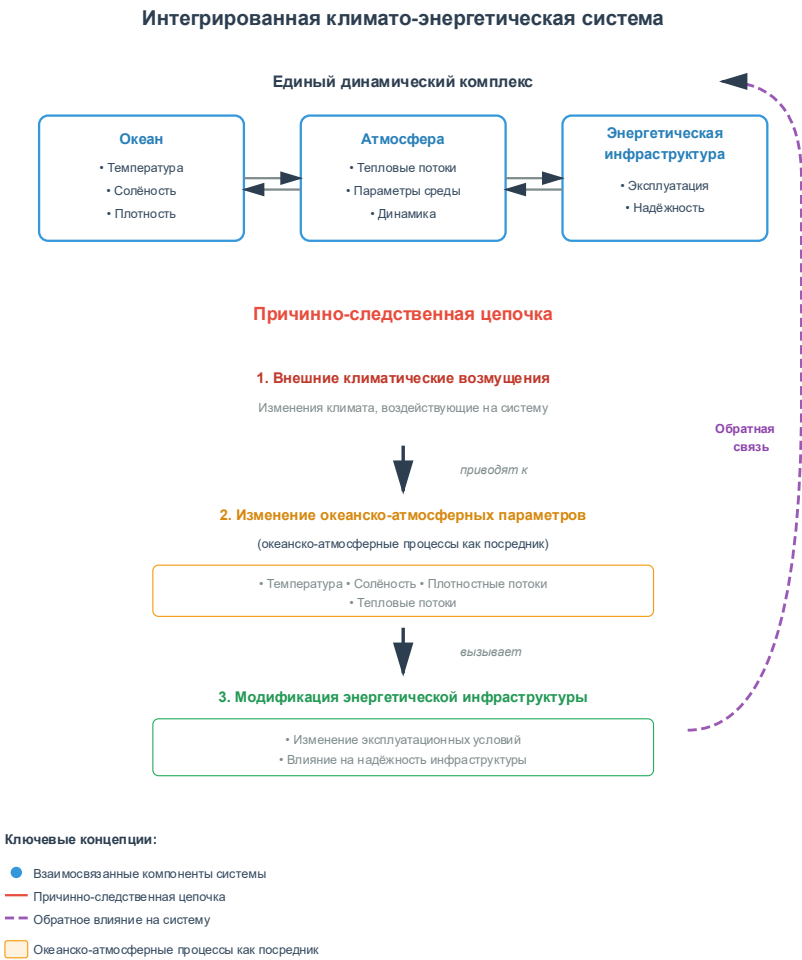


Рис. 2. Структурно-функциональная схема интегрированной климато-энергетической системы и причинно-следственных связей между её компонентами.

На современном этапе развития климатической и энергетической науки формируется концепция интегрированной климато-энергетической системы, в которой океан, атмосфера и энергетическая инфраструктура рассматриваются как взаимосвязанные компоненты единого динамического комплекса (Рис.2). В рамках этой парадигмы океанско-атмосферные процессы выступают в качестве посредника между изменениями климата и функционированием энергетического

сектора. Указанная взаимосвязь может быть представлена в виде причинно-следственной цепочки: внешние климатические возмущения приводят к изменению океанско-атмосферных параметров, таких как температура, солёность, плотностные и тепловые потоки, что, в свою очередь, вызывает модификацию эксплуатационных условий и надёжности энергетической инфраструктуры.

Системный анализ подобных взаимодействий выявляет наличие многокомпонентной неопределённости, включающей параметрическую, связанную с ограниченностью исходных данных и калибровочных коэффициентов; структурную, обусловленную неполнотой и приближённым характером используемых моделей; и сценарную, определяемую вариативностью социально-экономических траекторий и уровнем антропогенного воздействия [11].

Определив ключевые категориальные элементы - пороговое состояние (*tipping point*), устойчивое состояние системы, бифуркацию и энергетический риск, а также заложив математические основания их описания, представляется возможным перейти к анализу конкретных типов океанических пороговых состояний и их потенциального влияния на стратегию энергетической политики.

3 Основные типы океанических *tipping points*

В настоящем разделе систематизированы ключевые типы пороговых состояний океанской системы, которые имеют существенное значение с точки зрения влияния на энергетическую инфраструктуру и энергетику. Каждому типу присуща некоторая степень неопределённости, но совокупность свидетельств позволяет выделить три наиболее значимые группы: (i) крупномасштабные циркуляционные системы океана; (ii) морской лёд и связанная с ним альbedo-обратная связь; (iii) изменение биогеохимических и термодинамических параметров океанов (например, кислотность, кислородный состав).

3.1 Крупномасштабные циркуляционные системы океана

Одним из наиболее часто обсуждаемых пороговых элементов является Атлантическая меридиональная циркуляция (АМОС). В литературе отмечается, что ослабление АМОС может привести к резкому переключению в другой режим циркуляции и тем самым вызвать существенные климатические последствия. Например, в работе [11] приведены ранние предупреждающие сигналы с физической основой, указывающие на приближение порогового состояния АМОС. Дальнейший анализ [12] подтверждает значительный риск коллапса АМОС при текущей динамике океанского солёно-теплового режима. Нарушение нормального режима АМОС может повлиять на режим теплообмена, атмосферной циркуляции и, как следствие, на энергетические нагрузки и инфраструктурную устойчивость прибрежных секторов.

Аналитическая модель для описания этого процесса, может быть выражена следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = F(T, S) - \lambda M,$$

где M — меридиональный транспорт, $F(T, S)$ — плотностной приводящий поток, зависящий от температуры T и солёности S , λ — коэффициент обратной связи. При изменении T и S система может перейти из устойчивого режима $M \approx M_0$ в слабое состояние $M \ll M_0$ [13].

Таким образом, если АМОС перейдёт в новое состояние, изменятся температурные и осадки-ветровые режимы в ключевых регионах (например, Северная Европа, Северо-Атлантика), что повлияет на спрос на тепло и электроэнергию, а также на эксплуатацию прибрежной энергетики.

3.2 Системы морского льда и альbedo-обратные связи

Следующая существенная группа — это пороговые изменения, связанные с морским льдом, особенно в Арктике и Антарктике. Уменьшение площади и/или толщины морского льда запускает положительную обратную связь: снижение альbedo, приводящее к повышению поглощения солнечной радиации, в свою очередь приводящее к ускоренному таянию льда [14]. В обзоре отмечено, что для арктического летнего морского льда потенциально возможен режим перехода в почти свободное состояние от льда, хотя уверенность в наличии устойчивого *tipping point* пока небольшая [15]. В частности в нем говорится: «A tipping point in the Arctic Ocean would mean losing so much ice that its heat-reflecting effects are severely diminished» [15]. В этой связи для энергосектора наиболее актуален сценарий с сводными от льда морскими путями, изменённой ветровой и волновой динамикой, повышенными рисками для морской логистики и платформенных решений.

На данном примере, также введя аналитическое описание, можно формализовать поток радиационной энергии, изменяющийся вследствие уменьшения льда:

$$Q_{\text{rad}} = (1 - \alpha) S_{\text{in}},$$

где α — коэффициент отражения (альbedo), S_{in} — входной солнечный поток. С уменьшением α увеличивается Q_{rad} , что ускоряет потери льда. Для энергетической инфраструктуры северных морей это означает: сдвиги в ледовом режиме приводящие к смене условий эксплуатации ветроэнергетики, морской логистики для СПГ/нефтеперевозок и изменение инвестиционных рисков.

3.3 Биогеохимические и термодинамические пороги океанов

Наконец, стоит выделить пороговые изменения, относящиеся к накоплению тепла, кислородному минимуму, кислотности океана. Например, повышение кислотности может привести к нарушению кальцирования и росту сдвигов в экосистемах, что рассматривается как «physiological tipping points» океана [16]. Такие

изменения могут косвенно влиять на энергетику через изменение продуктивности морских систем, транспортных условий (глубинные воды), а также через влияние на климатические обратные связи. Отмечено, что при концентрации CO_2 около 450 ppm возможен порог для океанской кислотности [17].

Биогеохимические пороги, связанные с углеродным циклом и кислотностью океана, формируются вследствие нелинейной реакции карбонатной системы на повышение концентрации CO_2 . Динамика растворённого неорганического углерода (DIC) и щёлочности может быть представлена уравнениями

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= k_{\text{ex}}(pCO_2^{\text{atm}} - pCO_2^{\text{oc}}(C, A, T)) - J_{\text{bio}}(C) - J_{\text{sed}}(C), \\ \frac{dA}{dt} &= -\alpha J_{\text{bio}}(C) - \beta J_{\text{sed}}(C),\end{aligned}$$

где C — концентрация DIC, A — щёлочность; k_{ex} — коэффициент газообмена; pCO_2^{oc} — парциальное давление CO_2 , определяемое нелинейной карбонатной буферной системой; J_{bio} , J_{sed} — биологический поток и седиментация углерода. Пороговое состояние проявляется в виде резкого уменьшения концентрации иона CO_3^{2-} и индекса насыщения Ω , что приводит к снижению способности океана поддерживать структуры, богатые карбонатами. Данный процесс характеризуется сильным нелинейным откликом при достижении критической концентрации CO_2 в атмосфере, близкой к 450 ppm, согласно ряду модельных и эмпирических работ, обзор которых содержится в [17].

Для энергетической отрасли прежде всего важно, что такие биогеохимические изменения могут воздействовать на морскую инфраструктуру (коррозия, устойчивость платформ), на ресурсную базу (морская биомасса как энергоисточник) и на предсказуемость морского режима, что увеличивает неопределённость и риск.

Таким образом, все три группы пороговых элементов — циркуляционные, лед-альbedo и биогеохимические — имеют значительный потенциал воздействия на энергетику и требуют детального учёта в стратегическом энергетическом планировании. При этом важно отметить, что пороговые значения, время и масштаб изменений остаются весьма неопределёнными, что усиливает энергетические риски.

4 Связь климато-океанических tipping points с энергетическими рисками

Климатические *tipping points* океанической системы представляют собой не только фундаментальную проблему физической океанографии, но и источник системных рисков для глобальной и национальной энергетической безопасности [18]. Пороговые переходы в океане затрагивают широкий спектр климатических переменных — температуру поверхности, ветровую циркуляцию, осадки, динамику ледового покрова, уровень моря — которые прямо влияют на энергетическое производство, транспортировку ресурсов, инфраструктуру и потребление

энергии [19]. Вследствие нелинейного характера таких изменений традиционные энергетические прогнозы, основанные на трендовых допущениях, оказываются неполными: энергетическая система подвергается воздействию редких, но катастрофических событий, обладающих высокой вероятностью каскадного эффекта.

4.1 Физико-климатические механизмы влияния

Ключевыми каналами воздействия океанических *tipping points* на энергетику выступают (1) изменение пространственно-временной структуры ветровых и радиационных потоков, (2) перестройка гидрологического цикла, (3) изменение морского ледового режима и (4) дестабилизация прибрежных систем.

Ослабление Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС), являющееся одним из наиболее вероятных *tipping points*, ведёт к снижению теплового транспорта в Северную Атлантику, что вызывает охлаждение в регионе Европы и Арктики, усиление зимних экстремумов и увеличение сезонной изменчивости ветрового потенциала [20]. По расчётам, в сценарии ослабления АМОС на 40–50 % средние показатели ветровой мощности в Северо-Европейском бассейне могут сократиться до 15 %, а потребность в тепловой энергии — возрасти на 20–25 % [21], [22]. Эти изменения оказывают прямое влияние на баланс электроэнергетики и стратегическое распределение энергетических ресурсов.

Аналогичные эффекты наблюдаются при ускоренном таянии арктического морского льда. Сокращение площади льда приводит к усилению альbedo-обратной связи и дополнительному поглощению солнечной радиации, что изменяет бароклинную структуру атмосферы и усиливает экстремальные ветровые явления [23]. Такие явления увеличивают эксплуатационные риски морских энергетических платформ, ветропарков и инфраструктуры СПГ-производства. Кроме того, рост волновой активности в ледосвободных районах Арктики увеличивает нагрузку на морские сооружения и может сократить срок службы конструкций, снижая эффективность энергетических проектов на шельфе.

4.2 Энергетические риски и уязвимость инфраструктуры

Пороговые изменения океанской системы могут инициировать каскадные последствия для топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Риски проявляются в следующих направлениях:

– *Инфраструктурные риски*: повышение уровня моря вследствие таяния ледников и теплового расширения океана приводит к увеличению частоты затоплений прибрежных ТЭЦ, НПЗ и портов, особенно в низменных зонах АЗРФ, Азово-Черноморского и Балтийского регионов ;

– *Операционные риски*: изменения в температуре и солёности влияют на охлаждение тепловых станций и эффективность турбин, а также на доступность морских путей транспортировки энергоносителей;

– *Инвестиционные и рыночные риски*: неопределённость климатических условий повышает волатильность цен и снижает предсказуемость доходности долгосрочных проектов в возобновляемой энергетике, особенно в ветровом и гидрогенераторном секторах;

– *Системные риски*: множественные tipping points могут взаимодействовать между собой, вызывая каскадные эффекты — например, одновременное ослабление АМОС и ускоренное потепление Арктики способно изменить планетарную циркуляцию и энергетические балансы регионов [24].

4.3 Моделирование рисков и адаптационные стратегии

Для оценки этих рисков применяются модели сопряжённого климато-энергетического анализа (Integrated Assessment Models — IAMs), учитывающие взаимосвязь между динамикой климата, океанической циркуляцией и развитием энергетических систем [25]. В рамках таких моделей энергетический риск R_E можно определить как функцию климатической неопределённости и уязвимости инфраструктуры:

$$R_E = f(\sigma_c, V_I),$$

где σ_c — дисперсия климатических параметров (температура, скорость ветра, уровень моря), V_I — интегральный индекс уязвимости инфраструктуры. Рост σ_c при приближении tipping point ведёт к нелинейному увеличению R_E , что отражает усиление энергетической нестабильности.

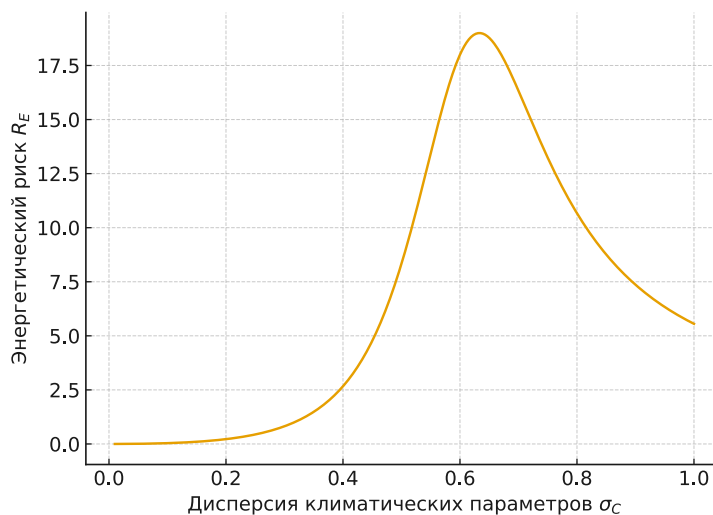


Рис. 3. Рост энергетического риска при увеличении климатической неопределённости и приближении системы к климатическому tipping point

График (Рис.3.) наглядно демонстрируют характерную для нелинейных климато-энергетических систем зависимость энергетического риска от величины климатической неопределённости. На Рис.3. представлена модельная оценка функции $R_E(\sigma_C)$, согласно которой при малых значениях дисперсии климатических параметров риск остаётся низким и изменяется слабо. По мере увеличения σ_C , отражающего рост неопределённости температуры, скорости ветра или уровня моря, наблюдается ускоренное возрастание R_E , связанное с усилением чувствительности энергетической инфраструктуры к отклонениям климатических условий. При приближении к критическому уровню неопределённости, соответствующему потенциальной области климатического tipping point, рост энергетического риска приобретает выраженный нелинейный характер, проявляющийся в формировании крутой кривой и локального максимума. Эта динамика отражает фундаментальное свойство климато-энергетических систем: потеря устойчивости отдельных климато-океанических подсистем приводит к непропорциональному увеличению операционных и инфраструктурных рисков в энергетике.

Для энергетической отрасли ключевым направлением становится внедрение адаптационного управления — создание систем мониторинга и раннего предупреждения на основе океанографических данных, а также разработка сценариев диверсификации энергетических активов. К примеру, интеграция спутникового мониторинга (ESA CCI, Copernicus Marine Service) с моделями прогноза ветрового и ледового режима позволяет повысить устойчивость прибрежной инфраструктуры и сократить неопределённость при планировании инвестиций в Арктическом регионе [26].

5 Оценка неопределённостей и сценариев развития

Анализ и прогнозирование пороговых изменений океанической системы и связанных с ними энергетических последствий невозможны без учёта неопределённостей, возникающих как на уровне физического моделирования, так и при формировании социально-экономических сценариев. Неопределённость в данном контексте представляет собой диапазон допустимых состояний системы, возникающих из-за ограниченности наблюдений, неполноты моделей, вариативности параметров и неизвестности будущих траекторий антропогенного воздействия [27]. Разделение неопределённостей на структурные, параметрические и сценарные является общепринятым подходом в современной климатической и энергетической науке [28], [29].

5.1 Структурные и параметрические неопределённости

Структурные неопределённости связаны с неполнотой или различием в построении моделей, описывающих океанские процессы, включая циркуляцию, обмен теплом и солями, формирование плотностных градиентов и взаимодействие

океана с атмосферой. Различные климатические модели, участвующие в проектах CMIP6 и DCPP, демонстрируют широкий разброс в оценках теплового содержания океана (Ocean Heat Content), глубины смешанного слоя и интенсивности меридиональной циркуляции. Например, оценка вероятности коллапса Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС) в XXI веке варьирует от менее 10 % до свыше 50 % в зависимости от применяемой модели и параметризации обратных связей [8].

Параметрические неопределённости возникают при выборе значений чувствительных коэффициентов, таких как альbedo морского льда, коэффициенты турбулентного обмена и парциальные давления CO₂ на границе океан–атмосфера. Малые вариации этих параметров могут существенно изменить прогноз времён перехода системы через критический порог, что делает результаты модельных экспериментов сильно зависимыми от калибровки [30]. Для количественной оценки параметрической неопределённости применяется метод Монте-Карло, позволяющий построить вероятностное распределение отклика системы при случайной вариации параметров в пределах их допустимых диапазонов.

5.2 Сценарные неопределённости и модели развития

Сценарные неопределённости определяются не столько ограничениями моделей, сколько вариативностью социально-экономических и политических траекторий, влияющих на уровень эмиссий, технологическое развитие и энергетический переход. В международной практике для этого применяются сценарные наборы Shared Socioeconomic Pathways (SSP), охватывающие диапазон от устойчивого (SSP1-2.6) до экстремального сценария (SSP5-8.5). Эти сценарии служат базой для сопоставления климатических прогнозов с энергетическими моделями — в частности, в рамках интегрированных моделей оценки (Integrated Assessment Models, IAMs) [31].

В энергетическом аспекте неопределённости проявляются в изменении регионального распределения возобновляемых источников энергии, доступности гидроресурсов, ветровых потенциалов и рисков для прибрежной инфраструктуры. Например, по результатам ансамбля CMIP6, изменение ветрового потенциала в Северной Европе при сценарии SSP3-7.0 может составить от –10 % до +5 %, а при SSP1-2.6 — снизиться менее чем на 3 % [32]. Такое расхождение в оценках затрудняет планирование развития морских ветропарков и требует учёта диапазона вероятных состояний системы в стратегическом моделировании ТЭК.

5.3 Комбинированные подходы и управление неопределённостью

Для интеграции различных типов неопределённостей в единый аналитический контекст используются методы мульти-модельного ансамблирования и сценарно-вероятностного анализа. Подход multi-model ensemble основан на объединении результатов множества независимых моделей с различными параметриза-

циями, что позволяет получить статистически устойчивую оценку диапазона возможных откликов океанской системы [33]. Для анализа энергетических рисков этот подход дополняется вероятностными моделями, в которых функции плотности распределения климатических параметров включаются в расчёт уязвимости энергетической инфраструктуры.

Одним из инструментов системного учёта неопределённости является метод чувствительности глобального энергетического баланса, который позволяет оценить вклад отдельных климатических факторов в изменение энергетической устойчивости. В простейшем виде он выражается уравнением:

$$S_E = \frac{\partial R_E}{\partial \mu_i},$$

где S_E — чувствительность энергетического риска R_E к изменению параметра μ_i (например, температуры, уровня моря или скорости ветра). Высокие значения S_E указывают на необходимость адаптационных мер, направленных на уменьшение уязвимости к данному параметру [72].

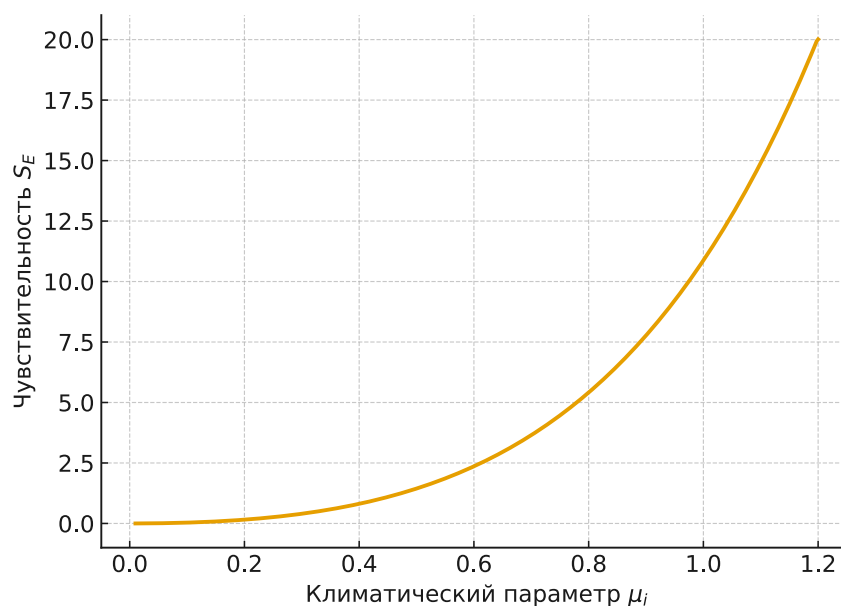


Рис. 4. Чувствительность энергетического риска к изменению климатического параметра μ_i в нелинейной климато-энергетической системе

Построенный на Рис.4 график иллюстрирует изменение чувствительности энергетического риска S_E по отношению к климатическому параметру μ_i , который в контексте анализа может представлять аномалию температуры, уровень

моря, интенсивность ветра или иной климатический драйвер. Значения S_E получены путём численного дифференцирования модельной функции риска $R_E(\mu_i)$, отражающей предполагаемую нелинейную зависимость энергетической уязвимости от величины климатического воздействия. В используемой демонстрационной форме риск описывается монотонно возрастающей функцией $R_E = \mu_i^3 e^{\mu_i}$, позволяющей зафиксировать усиление отклика энергетической системы при увеличении климатического давления. Чувствительность определяется как первая производная $S_E = \partial R_E / \partial \mu_i$, вычисленная методами численного градиента. Характер кривой показывает, что при малых значениях μ_i чувствительность остаётся низкой, что отражает слабую реакцию энергетической системы на небольшие климатические возмущения. Однако по мере увеличения μ_i чувствительность возрастает экспоненциально, что указывает на усиление неустойчивости и рост вероятности возникновения критических состояний. Данный пример демонстрирует, что даже относительно плавные изменения климатических параметров могут приводить к резкому увеличению энергетических рисков при приближении системы к потенциальным пороговым значениям, что подчёркивает необходимость предварительной оценки чувствительности инфраструктуры к ключевым климатическим драйверам.

5.4 Неопределённость и политика управления рисками

В контексте энергетической политики ключевой задачей становится переход от реактивного управления рисками к превентивному, основанному на оценке диапазона вероятных сценариев. Это требует интеграции климатических данных в национальные энергетические стратегии, совершенствования систем мониторинга океанских процессов и разработки методик оценки климатических угроз для ТЭК. Практика ведущих энергетических агентств (IEA, OECD, IPCC) показывает, что внедрение систем сценарного планирования с учётом пороговых изменений позволяет повысить устойчивость энергетического сектора при глобальной неопределённости [34].

Оценка неопределённостей и сценариев развития представляет собой необходимое условие для формирования научно обоснованных прогнозов и адаптивных энергетических стратегий. Только системное сочетание климатического моделирования, сценарного анализа и вероятностной оценки способно обеспечить адекватное понимание рисков, связанных с переходом океанской системы через критические пороги в XXI веке.

6 Геополитические и экономические последствия для энергетической политики

Океанические *tipping points* становятся не только предметом фундаментальных климатических исследований, но и фактором, оказывающим прямое воздействие на международную энергетическую безопасность и геоэкономические балансы. В XXI веке климатические риски, возникающие вследствие нелинейных изменений океанической системы, начинают определять архитектуру глобального энергетического управления, перераспределение энергетических потоков и стратегию технологического развития государств [35]. Пороговые климатические переходы, включая возможное ослабление Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС), ускоренное потепление Арктики и деградацию морского льда, способны радикально изменить условия функционирования топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и вызвать перераспределение экономических интересов на международном уровне [36].

6.1 Изменение пространственно-временной структуры энергетических ресурсов

Потепление океанов и сдвиги в циркуляции тепла влияют на распределение возобновляемых энергетических ресурсов — ветра, солнечной радиации, гидропотенциала и биомассы. Моделирование по сценариям CMIP6 показывает, что смещение климатических зон на 5–8° широты при сценарии SSP5-8.5 может вызвать перераспределение ветрового потенциала в Северном полушарии, с уменьшением до 20 % в Европе и увеличением до 15–18 % в Восточной Азии [37]. Эти изменения создают предпосылки для усиления конкуренции в области размещения оффшорных ветропарков и переориентации инвестиционных потоков в регионы с более стабильными климатическими условиями.

Арктический регион представляет собой особый пример, где деградация ледового покрова, с одной стороны, облегчает доступ к углеводородным ресурсам континентального шельфа, а с другой — усиливает экологические и технологические риски [38], [39]. Открытие Северного морского пути как круглогодичного транспортного коридора способно изменить мировые маршруты транспортировки энергоносителей, создавая новые точки геополитической напряжённости между Россией, странами Северной Европы, США и Китаем [40]. В то же время рост частоты экстремальных погодных явлений и нестабильность ледовых условий усложняют эксплуатацию инфраструктуры и повышают стоимость страхования энергетических активов [41].

6.2 Геоэкономические и рыночные последствия

Пороговые изменения океанической системы усиливают неопределённость на глобальных энергетических рынках, поскольку влияют на климатические условия производства и транспортировки энергоресурсов, а также на уровень спроса

на энергию в ключевых экономиках [42]. В периоды климатических аномалий, связанных с нарушением океанской циркуляции (например, Эль-Ниньо и Ла-Нинья), наблюдается рост волатильности цен на нефть и природный газ, что затрудняет долгосрочное планирование экспортно-импортных операций [43].

Кроме того, изменение структуры энергетического спроса под воздействием климатических факторов усиливает макроэкономические диспропорции между странами-производителями и странами-потребителями энергии. Согласно оценкам Международного энергетического агентства (IEA), совокупные климатические риски, связанные с нарушением морской циркуляции и повышением уровня моря, могут увеличить издержки глобальной энергетической системы на 0,3–0,6 % мирового ВВП к 2050 году [44]. Эти потери включают затраты на восстановление инфраструктуры, страхование рисков и снижение производительности из-за перебоев в энергоснабжении.

6.3 Трансформация международной энергетической политики

Климатически обусловленные океанические риски усиливают необходимость перехода к *адаптивной энергетической политике*, предполагающей включение климатических факторов в долгосрочные стратегические и инвестиционные решения. На международном уровне наблюдается усиление роли механизмов климатической координации — в частности, инициатив Европейского союза (European Green Deal) и Программы устойчивого энергетического развития ООН, направленных на декарбонизацию и развитие климато-устойчивой энергетики [45].

Для России и других стран с высоким потенциалом Арктического и морского энергетического развития актуальными становятся задачи формирования климатически чувствительной энергетической стратегии, включающей сценарное моделирование океанических рисков, развитие морских наблюдательных систем и диверсификацию экспортных маршрутов [18], [46]. Включение данных океанографического мониторинга в прогнозы энергобаланса позволит повысить устойчивость энергетического сектора и снизить уязвимость к внезапным климатическим сдвигам.

6.4 Геополитические риски и международная конкуренция

Пороговые изменения океанической системы усиливают геополитическую взаимозависимость стран в вопросах доступа к энергетическим ресурсам и транспортным коридорам. Потенциальный коллапс АМОС или ускоренное потепление Арктики могут изменить распределение климатических преимуществ и вызвать перераспределение экономического влияния между регионами. В частности, ожидается, что потепление Арктики ускорит освоение Севера Евразии и усилит геополитическое значение Российской Федерации в качестве ключевого поставщика энергоресурсов для Азии [47].

В то же время растущая зависимость мировой экономики от климато-чувствительных источников энергии (ветровая, солнечная, гидроэнергия) создаёт риск технологической и ресурсной асимметрии между государствами, располагающими необходимыми природными условиями и технологическими компетенциями, и странами-импортёрами таких технологий [48]. В условиях нарастания климатических неопределённостей такие различия способны трансформироваться в новую форму «энергетического неравенства», усиливая стратегическую конкуренцию на фоне перехода к низкоуглеродной энергетике.

Таким образом, океанические *tipping points* выступают ключевым элементом геополитического уравнения XXI века, определяя долгосрочные тенденции энергетической безопасности, международного сотрудничества и экономической устойчивости. Осознание взаимосвязи между климатическими пороговыми процессами и энергетической политикой является необходимым условием для формирования адаптивных стратегий в условиях усиливающейся глобальной турбулентности.

7 Адаптационные стратегии и предложения для энергетической политики России

Адаптация энергетической отрасли России к последствиям климатических изменений и потенциальным океаническим *tipping points* требует комплексного подхода, сочетающего научно-технологические, институциональные и экономические меры. В условиях усиливающейся климатической изменчивости, потепления Арктики и возрастания экстремальных явлений устойчивость ТЭК становится ключевым элементом национальной безопасности и стратегического развития [49]. Принципиально важно не только минимизировать уязвимость энергетической инфраструктуры к физическим рискам, но и использовать климатические и океанографические изменения как стимул для модернизации и диверсификации энергетического сектора.

7.1 Научно-технологические направления адаптации

Первостепенной задачей является развитие системы климато-энергетического мониторинга, способной обеспечивать регулярное получение информации о состоянии океанской среды, ветрового и ледового режимов, а также параметров циркуляции, влияющих на эксплуатацию энергетической инфраструктуры. Создание интегрированной национальной сети наблюдений, объединяющей данные Росгидромета, Роснедр, Росатомфлота, ИО РАН и МГУ, позволит повысить точность прогнозов для арктических и прибрежных регионов [50]. Необходимым направлением является развитие цифровых моделей сопряжённой динамики «океан–атмосфера–энергетика», обеспечивающих сценарное моделирование рисков для ТЭК при различных климатических условиях.

Особое значение имеет модернизация инфраструктуры северных и прибрежных энергетических объектов с учётом ожидаемого повышения уровня моря, роста штормовой активности и таяния вечной мерзлоты. Для этого требуется внедрение технологий климатически устойчивого проектирования, предусматривающих использование адаптивных материалов, гибких систем охлаждения, ледостойких платформ и резервных систем энергоснабжения [51]. Разработка отечественных стандартов оценки климатических рисков для проектирования энергетических объектов в Арктике представляется необходимым условием долгосрочной стабильности сектора.

7.2 Институциональные и управленческие меры

На уровне государственной политики требуется интеграция климатического компонента в стратегические документы энергетического планирования, включая *Энергетическую стратегию России до 2050 года* и национальные программы по декарбонизации. Следует предусмотреть создание межведомственного центра анализа климатических рисков для ТЭК, который будет обеспечивать взаимодействие научных институтов, органов власти и промышленных корпораций в вопросах адаптации и прогнозирования климатических угроз [52].

Рекомендуется внедрение системы обязательной оценки климатических рисков при разработке инвестиционных и инфраструктурных проектов в энергетике. Такая система должна опираться на показатели климатической чувствительности, разработанные для каждого региона, и учитывать вероятность прохождения океанических *tipping points*, влияющих на ледовый режим, ветровые ресурсы и термические балансы [53]. Аналогичные механизмы оценки рисков уже реализуются в Европейском союзе и Японии, где климатические сценарии интегрированы в процедуры лицензирования энергетических предприятий.

7.3 Экономические и стратегические приоритеты

Адаптация к климатическим вызовам требует диверсификации структуры энергопроизводства и снижения зависимости от уязвимых климатических ресурсов. Важно развивать децентрализованные и автономные источники энергии, включая малые ВИЭ, для удалённых арктических и прибрежных поселений. При этом целесообразно расширение государственной поддержки научно-исследовательских программ в области морской ветровой энергетики, приливных и волновых установок, которые способны компенсировать региональные климатические колебания.

Экономическая устойчивость ТЭК в условиях климатических рисков также требует развития механизмов страхования инфраструктурных проектов и формирования национального фонда климатической адаптации, направленного на модернизацию критически важных объектов. В долгосрочной перспективе интеграция климатических и океанографических факторов в энергетическое прогнозирование обеспечит не только снижение потенциальных потерь, но и повышение

конкурентоспособности российского энергетического сектора на международных рынках.

7.4 Международное сотрудничество и технологическая интеграция

Россия может играть ключевую роль в формировании международной повестки по исследованию и мониторингу океанических изменений, влияющих на энергетику. Участие в международных программах, таких как *Arctic Council Working Group on the Protection of the Arctic Marine Environment* (PAME) [54] и *Global Ocean Observing System (GOOS)* [55], позволит не только обмениваться данными, но и развивать совместные проекты по климатической адаптации энергетической инфраструктуры.

Кроме того, важно укрепление сотрудничества с азиатскими партнёрами (Китай, Республика Корея, Индия) в области технологий адаптации прибрежной энергетики, а также создание международных консорциумов для разработки устойчивых энергетических решений в Арктике. Такая стратегия позволит сочетать научный потенциал России в области океанографии и климатологии с инвестиционными возможностями зарубежных партнёров, обеспечивая глобальную конкурентоспособность отечественной энергетической политики.

Таким образом, адаптационные стратегии для энергетической политики России должны носить междисциплинарный и системный характер, сочетая физико-климатическое моделирование, экономические механизмы и институциональные реформы. Учёт вероятности океанических переломных состояний в стратегическом планировании является ключевым элементом обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития страны в условиях глобальных климатических трансформаций.

8 Заключение

Пороговые изменения океанической системы (*oceanic tipping points*) представляют собой один из ключевых вызовов XXI века для мировой и национальной энергетики. Их изучение и прогнозирование имеют не только фундаментальное значение для понимания климата Земли, но и прикладное значение для обеспечения энергетической безопасности, устойчивого развития и адаптации экономики к глобальным изменениям. Современные исследования подтверждают, что океан играет центральную роль в перераспределении тепловой энергии и углерода, а следовательно, является важнейшим регулятором глобального энергетического баланса [26]. Нелинейный характер отклика океанских систем на антропогенное воздействие делает возможными резкие и необратимые климатические переходы, последствия которых для энергетики могут быть масштабными и долгосрочными.

Рассмотренные различные типы *tipping points*, в том числе: ослабление Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС), деградация морского льда Арктики, изменение биогеохимического состояния океана, демонстрируют, что даже

умеренные климатические возмущения способны привести к существенным изменениям в режимах ветра, осадков, температуры и уровня моря. Эти процессы определяют потенциал возобновляемых источников энергии, условия функционирования прибрежной инфраструктуры, транспортную логистику и стоимость энергетических ресурсов. Следовательно, игнорирование вероятности прохождения океаном критических порогов при стратегическом планировании ТЭК может привести к недооценке долгосрочных рисков и снижению устойчивости энергетической системы.

Научно-технический прогресс последних лет и развитие моделей (CMIP6), повышение точности спутникового и поверхностного мониторинга (ARGO, Sorernicus), а также применение вероятностных и байесовских методов анализа создают условия для более точного прогнозирования и оценки ранних признаков потери устойчивости океанических подсистем [56]. Тем не менее, неопределённости, обусловленные структурной неполнотой моделей, вариациями параметров и сценарным многообразием, остаются значительными. Поэтому интеграция климатических данных и моделей в энергетическую аналитику требует системного и междисциплинарного подхода.

Для России, обладающей крупнейшими в мире морскими и арктическими акваториями, учёт океанических переломных состояний является стратегической необходимостью. Развитие системы климатического и океанографического мониторинга, адаптация инфраструктуры северных регионов, внедрение климаточувствительных стандартов проектирования и диверсификация энергетической структуры создают основу для устойчивого функционирования ТЭК в условиях усиливающихся климатических рисков [57], [58]. Ключевым направлением становится формирование адаптивной энергетической политики, включающей сценарный анализ океанических tipping points, вероятностную оценку энергетических рисков и развитие международного сотрудничества в области мониторинга и управления климатическими угрозами.

В заключение следует подчеркнуть, что устойчивость энергетической системы России в XXI веке определяется не только технологическим обновлением и диверсификацией, но и способностью интегрировать научное знание о климатических пороговых процессах в стратегические решения. Системное взаимодействие между климатологией, океанологией и энергетикой становится необходимым условием для выработки долгосрочной стратегии, направленной на обеспечение энергетической безопасности и минимизацию последствий глобальных климатических трансформаций.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0017).

Литература

1. Gulev S.K. Global climate change and the oceans // *Studies on Russian Economic Development*. 2023. № 6(34). С. 738–745.
2. Forster P.M., Smith C.J., Walsh T., Lamb W.F., Lamboll R., Hauser M., Ribes A., Rosen D., Gillett N., Palmer M.D., others. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence // *Earth System Science Data*. 2023. № 6(15). С. 2295–2327.
3. Abraham J., Cheng L., Mann M.E., Trenberth K., von Schuckmann K. The ocean response to climate change guides both adaptation and mitigation efforts // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2022. № 4(15). С. 100221.
4. Erikson L., Morim J., Hemer M., Young I., Wang X.L., Mentaschi L., Mori N., Semedo A., Stopa J., Grigorieva V., others. Global ocean wave fields show consistent regional trends between 1980 and 2014 in a multi-product ensemble // *Communications Earth & Environment*. 2022. № 1(3). С. 320.
5. Bange H.W., Mongwe P., Shutler J.D., Arévalo-Martínez D.L., Bianchi D., Lauvset S.K., Liu C., Löscher C.R., Martins H., Rosentreter J.A., others. Advances in understanding of air–sea exchange and cycling of greenhouse gases in the upper ocean // *Elem Sci Anth*. 2024. № 1(12). С. 44.
6. Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A., Feulner G., Saba V. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation // *Nature*. 2018. № 7700(556). С. 191–196.
7. Pokazeev K. V., Solovyev D.A., Nefedova L. V. New Opportunities for the Development of Renewable Sources of Hydrosphere Energy // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, 2022. С. 203–209.
8. Wunderling N., von der Heydt A.S., Aksenov Y., Barker S., Bastiaansen R., Brovkin V., Brunetti M., Couplet V., Kleinen T., Lear C.H., others. Climate tipping point interactions and cascades: a review // *Earth System Dynamics*. 2024. № 1(15). С. 41–74.
9. Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T.M., Folke C., Liverman D., Summerhayes C.P., Barnosky A.D., Cornell S.E., Crucifix M., others. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene // *Proceedings of the national academy of sciences*. 2018. № 33(115). С. 8252–8259.
10. McIntyre M.E. Climate tipping points: A personal view // *Physics Today*. 2023. № 3(76). С. 44–49.
11. Lenton T.M., Livina V.N., Dakos V., van Nes E.H., Scheffer M. Early warning of climate tipping points from critical slowing down: comparing methods to improve robustness // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. № 1962(370). С. 1185–1204. DOI:10.1098/rsta.2011.0304.
12. Weijer W., Cheng W., Drijfhout S.S., Fedorov A. V., Hu A., Jackson L.C., Liu W., McDonagh E.L., Mecking J. V., Zhang J. Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review and synthesis // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. № 8(124). С. 5336–5375.
13. Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow // *Tellus*. 1961. № 2(13). С. 224–230.
14. Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // *Вестник РАН*. 2008. № 1(78). С. 20–27.

15. Serreze M. Does Arctic Sea Ice Have a Tipping Point? [Электронный ресурс]. . 2023 URL: <https://nsidc.org/learn/ask-scientist/does-arctic-sea-ice-have-tipping-point> (дата обращения: 19.11.2025).
16. Cornwall C.E., Comeau S., Harvey B.P. Are physiological and ecosystem-level tipping points caused by ocean acidification? A critical evaluation // *Earth System Dynamics*. 2024. № 3(15). С. 671–687.
17. Allen M., Dube O.P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., others. Special report: Global warming of 1.5 C // *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. 2018. (677). С. 393.
18. Гулев С.К., Соловьев Д.А. Глобальные климатические изменения и роль России: новые вызовы и решения COP28 // *Окружающая среда и энергосодержание*. 2024. № 3(23). С. 4–12. DOI:10.24412/2658-6703-2024-3-4-12. – EDN BTKZAF.
19. Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е. Эколого-климатические риски социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации // *Экологический вестник России*. 2016. № 1. С. 32–39.
20. Соловьев Д.А., Нефедова Л.В. Перспективы использования европейской ветроэнергетики для преодоления энергетического кризиса // *Окружающая среда и энергосодержание*. 2022. № 4. С. 50–58.
21. Jackson L.C., Kahana R., Graham T., Ringer M.A., Woollings T., Mecking J. V, Wood R.A. Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM // *Climate dynamics*. 2015. № 11(45). С. 3299–3316.
22. Patricola C.M., Wehner M.F. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events // *Nature*. 2018. № 7731(563). С. 339–346.
23. Screen J.A., Deser C., Smith D.M., Zhang X., Blackport R., Kushner P.J., Oudar T., McCusker K.E., Sun L. Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models // *Nature Geoscience*. 2018. № 3(11). С. 155–163.
24. Lenton T.M., Milkoreit M., Willcock S., Abrams J.F., Mc Kay D.L.A., Buxton J.E., Donges J., Loriani S., Wunderling N., Alkemade F., others. Global tipping points report 20252025.
25. Wang Z., Wu J., Liu C., Gu G., others. Integrated assessment models of climate change economicsSpringer, 2017.
26. Raschke E., Jacob D. Energy and water cycles in the climate system. (5)Springer Science & Business Media, 2013.
27. Knutti R., Sedláček J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections // *Nature climate change*. 2013. № 4(3). С. 369–373.
28. Hawkins E., Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009. № 8(90). С. 1095–1108.
29. Curry J.A., Webster P.J. Climate science and the uncertainty monster // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011. № 12(92). С. 1667–1682.
30. Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature*. 2013. № 7459(499). С. 464–467.
31. Riahi K., Van Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J., O’neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., others. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global environmental change*. 2017. (42). С. 153–168.
32. Pryor S.C., Barthelmie R.J. Climate change impacts on wind energy: A review // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2010. № 1(14). С. 430–437.

33. Tebaldi C., Knutti R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections // *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*. 2007. № 1857(365). С. 2053–2075.
34. International Energy Agency. *Climate Resilience for Energy Security*. Paris: , 2022.
35. Yang Y., Xia S., Qian X. Geopolitics of the energy transition // *Journal of Geographical Sciences*. 2023. № 4(33). С. 683–704.
36. Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points—too risky to bet against // *Nature*. 2019. № 7784(575). С. 592–595.
37. Gernaat D.E.H.J., de Boer H.S., Daioglou V., Yalaw S.G., Müller C., van Vuuren D.P. Climate change impacts on renewable energy supply // *Nature Climate Change*. 2021. № 2(11). С. 119–125.
38. Østreng W. *The natural and societal challenges of the Northern Sea Route: a reference work* Springer Science & Business Media, 2013.
39. Нефедова Л.В., Моргунова М.О., Соловьев Д.А. Потенциал и риски развития возобновляемой энергетики для повышения энергетической и экологической безопасности в Арктическом регионе // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019 : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (23 – 26 сентября 2019 г.)*. 2019. С. 1173–1176.
40. Соловьев Д.А., Нефедова Л.В. Северный морской путь: экономический потенциал, климатическая устойчивость и геополитическое партнерство России и Китая // *Энергетическая политика*. 2025. № 8(211). С. 10–23. DOI:10.46920/2409-5516_2025_08211_10.
41. Коваленко А.С., Моргунова М.О., Грибковская В.В. Инфраструктурная синергия Северного морского пути в международном контексте // *Энергетическая политика*. 2018. № 4. С. 57–67.
42. Dietz S., Rising J., Stoerk T., Wagner G. Economic impacts of tipping points in the climate system // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021. № 34(118). С. e2103081118.
43. Diffenbaugh N.S., Burke M. Global warming has increased global economic inequality // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. № 20(116). С. 9808–9813.
44. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023*. Paris: , 2023.
45. Elkerbout M., Egenhofer C., Núñez Ferrer J., Catuti M., Kustova I., Rizos V., others. The European Green Deal after Corona: Implications for EU climate policy // *CEPS Policy Insights*. 2020. № 2020/06. С. 1–12.
46. Гулев С.К. Глобальные изменения климата и мировой океан // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № No 6, № 2023. С. 25–36. DOI:10.47711/0868-6351-201-25-36.
47. Соловьев Д.А., Моргунова М.О. Комплексное освоение российской Арктики: климатические вызовы, транспортные коридоры и новые энергетические технологии // *Энергетическая политика*. 2018. № 4. С. 89–98.
48. Бушуев В.В., Габдрахманова Т.С., Моргунова М.О., Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. *Энергетическая инфраструктура Арктической зоны Российской Федерации*. Москва: ИД «Шанс», 2019.
49. Министерство энергетики Российской Федерации. *Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года [Электронный ресурс]*. . 2024.

50. Землянов И.В. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ СРЕДЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (ОБЗОР) // Океанологические исследования. 2024. № 2(52). С. 107–120.
51. Nefedova L.V., Solovyev D.A. Assessment of the global climate change impact on Fuel and Energy Complex infrastructure and adaptation opportunities in the Russian Arctic // IOP Conference Series. 2020. № 606. С. 1040. DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012040.
52. Consultation Paper: «Climate physical risks: approaches to analysis and recognition in financial sector».2022.
53. Schaeffer R., Szklo A.S., De Lucena A.F.P., Borba B.S.M.C., Nogueira L.P.P., Fleming F.P., Troccoli A., Harrison M., Boulahya M.S. Energy sector vulnerability to climate change: A review // Energy. 2012. № 1(38). С. 1–12.
54. Protection of the Arctic Marine Environment [Электронный ресурс]. . 2025URL: <https://pame.is/> (дата обращения: 19.11.2025).
55. Global Ocean Observing System (GOOS) [Электронный ресурс]. . 2025URL: <https://goosocan.org/> (дата обращения: 19.11.2025).
56. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., others. Taking climate model evaluation to the next level // Nature Climate Change. 2019. № 2(9). С. 102–110.
57. Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Возможности и риски использования ВИЭ при энергообеспечении туризма в Арктике // ВМатериалы VI Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и XII школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени чл.-корр. РАН Э.Э. Шпильрайна. 12-15 октября 2020 г. 2020. С. 92–96. DOI:10.33580/2313-5743-2020-8-1-92-96.
58. Агафонова Е.А., Берёзкин М.Ю., Бушуев В.В., Вerezemskaya П.С., Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Колпаков А.Ю., Криницкий М.А., Нефедова Л.В., Показеев К.В., Саенко В.В., Синюгин О.А., Соловьев Д.А., Фёдорова Е.В., Фёдоров В.М., Фролов Д.М. Климатические изменения и энергетика. Москва: «КДУ», 2024.

References

1. Gulev S.K. Global climate change and the oceans // *Studies on Russian Economic Development*. 2023. No. 6(34). Pp. 738–745.
2. Forster P.M., Smith C.J., Walsh T., Lamb W.F., Lamboll R., Hauser M., Ribes A., Rosen D., Gillett N., Palmer M.D., others. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence // *Earth System Science Data*. 2023. No. 6(15). Pp. 2295–2327.
3. Abraham J., Cheng L., Mann M.E., Trenberth K., von Schuckmann K. The ocean response to climate change guides both adaptation and mitigation efforts // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2022. No. 4(15). P. 100221.
4. Erikson L., Morim J., Hemer M., Young I., Wang X.L., Mentaschi L., Mori N., Semedo A., Stopa J., Grigorieva V., others. Global ocean wave fields show consistent regional trends between 1980 and 2014 in a multi-product ensemble // *Communications Earth & Environment*. 2022. No. 1(3). P. 320.
5. Bange H.W., Mongwe P., Shutler J.D., Arévalo-Martínez D.L., Bianchi D., Lauvset S.K., Liu C., Löscher C.R., Martins H., Rosentreter J.A., others. Advances in understanding of air–sea exchange and cycling of greenhouse gases in the upper ocean // *Elem Sci Anth*. 2024. No. 1(12). P. 44.

6. Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A., Feulner G., Saba V. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation // *Nature*. 2018. No. 7700(556). Pp. 191–196.
7. Pokazeev K.V., Solovyev D.A., Nefedova L.V. New Opportunities for the Development of Renewable Sources of Hydrosphere Energy // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, 2022. Pp. 203–209.
8. Wunderling N., von der Heydt A.S., Aksenov Y., Barker S., Bastiaansen R., Brovkin V., Brunetti M., Couplet V., Kleinen T., Lear C.H., others. Climate tipping point interactions and cascades: a review // *Earth System Dynamics*. 2024. No. 1(15). Pp. 41–74.
9. Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T.M., Folke C., Liverman D., Summerhayes C.P., Barnosky A.D., Cornell S.E., Crucifix M., others. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. No. 33(115). Pp. 8252–8259.
10. McIntyre M.E. Climate tipping points: A personal view // *Physics Today*. 2023. No. 3(76). Pp. 44–49.
11. Lenton T.M., Livina V.N., Dakos V., van Nes E.H., Scheffer M. Early warning of climate tipping points from critical slowing down: comparing methods to improve robustness // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. No. 1962(370). Pp. 1185–1204. DOI:10.1098/rsta.2011.0304.
12. Weijer W., Cheng W., Drijfhout S.S., Fedorov A.V., Hu A., Jackson L.C., Liu W., McDonagh E.L., Mecking J.V., Zhang J. Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review and synthesis // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. No. 8(124). Pp. 5336–5375.
13. Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow // *Tellus*. 1961. No. 2(13). Pp. 224–230.
14. Gulev S.K., Kattsov V.M., Solomina O.N. Global warming continues // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2008. No. 1(78). Pp. 20–27.
15. Serreze M. Does Arctic Sea Ice Have a Tipping Point? [Electronic resource]. 2023. URL: <https://nsidc.org/learn/ask-scientist/does-arctic-sea-ice-have-tipping-point> (accessed: 19.11.2025).
16. Cornwall C.E., Comeau S., Harvey B.P. Are physiological and ecosystem-level tipping points caused by ocean acidification? A critical evaluation // *Earth System Dynamics*. 2024. No. 3(15). Pp. 671–687.
17. Allen M., Dube O.P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., others. Special report: Global warming of 1.5°C // *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. 2018. (677). P. 393.
18. Gulev S.K., Solovyev D.A. Global climate change and the role of Russia: new challenges and solutions of COP28 // *Environment and Energy Studies*. 2024. No. 3(23). Pp. 4–12. DOI:10.24412/2658-6703-2024-3-4-12.
19. Porfiriev B.N., Terentyev N.E. Environmental and climate risks for the socio-economic development of the Arctic Zone of the Russian Federation // *Ecological Bulletin of Russia*. 2016. No. 1. Pp. 32–39.
20. Solovyev D.A., Nefedova L.V. Prospects for using European wind power to overcome the energy crisis // *Environment and Energy Studies*. 2022. No. 4. Pp. 50–58.
21. Jackson L.C., Kahana R., Graham T., Ringer M.A., Woollings T., Mecking J.V., Wood R.A. Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high-resolution GCM // *Climate Dynamics*. 2015. No. 11(45). Pp. 3299–3316.
22. Patricola C.M., Wehner M.F. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events // *Nature*. 2018. No. 7731(563). Pp. 339–346.

23. Screen J.A., Deser C., Smith D.M., Zhang X., Blackport R., Kushner P.J., Oudar T., McCusker K.E., Sun L. Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models // *Nature Geoscience*. 2018. No. 3(11). Pp. 155–163.
24. Lenton T.M., Milkoreit M., Willcock S., Abrams J.F., McKay D.L.A., Buxton J.E., Donges J., Loriani S., Wunderling N., Alkemade F., others. *Global Tipping Points Report 2025*. 2025.
25. Wang Z., Wu J., Liu C., Gu G., others. *Integrated Assessment Models of Climate Change Economics*. Springer, 2017.
26. Raschke E., Jacob D. *Energy and Water Cycles in the Climate System*. Springer Science & Business Media, 2013.
27. Knutti R., Sedláček J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections // *Nature Climate Change*. 2013. No. 4(3). Pp. 369–373.
28. Hawkins E., Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009. No. 8(90). Pp. 1095–1108.
29. Curry J.A., Webster P.J. Climate science and the uncertainty monster // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011. No. 12(92). Pp. 1667–1682.
30. Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature*. 2013. No. 7459(499). Pp. 464–467.
31. Riahi K., Van Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., others. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environmental Change*. 2017. (42). Pp. 153–168.
32. Pryor S.C., Barthelmie R.J. Climate change impacts on wind energy: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. No. 1(14). Pp. 430–437.
33. Tebaldi C., Knutti R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007. No. 1857(365). Pp. 2053–2075.
34. International Energy Agency. *Climate Resilience for Energy Security*. Paris, 2022.
35. Yang Y., Xia S., Qian X. Geopolitics of the energy transition // *Journal of Geographical Sciences*. 2023. No. 4(33). Pp. 683–704.
36. Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points—too risky to bet against // *Nature*. 2019. No. 7784(575). Pp. 592–595.
37. Gernaat D.E.H.J., de Boer H.S., Daioglou V., Yalew S.G., Müller C., van Vuuren D.P. Climate change impacts on renewable energy supply // *Nature Climate Change*. 2021. No. 2(11). Pp. 119–125.
38. Østreng W. *The Natural and Societal Challenges of the Northern Sea Route: A Reference Work*. Springer Science & Business Media, 2013.
39. Nefedova L.V., Morgunova M.O., Solovyev D.A. The potential and risks of renewable energy development for improving energy and environmental security in the Arctic region // *Ecological, Industrial and Energy Security – 2019: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2019. Pp. 1173–1176.
40. Solovyev D.A., Nefedova L.V. The Northern Sea Route: economic potential, climate resilience, and geopolitical partnership between Russia and China // *Energy Policy*. 2025. No. 8(211). Pp. 10–23. DOI:10.46920/2409-5516_2025_08211_10.
41. Kovalenko A.S., Morgunova M.O., Gribkovskaya V.V. Infrastructure synergy of the Northern Sea Route in an international context // *Energy Policy*. 2018. No. 4. Pp. 57–67.

42. Dietz S., Rising J., Stoerk T., Wagner G. Economic impacts of tipping points in the climate system // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021. No. 34(118). P. e2103081118.
43. Diffenbaugh N.S., Burke M. Global warming has increased global economic inequality // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. No. 20(116). Pp. 9808–9813.
44. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023*. Paris, 2023.
45. Elkerbout M., Egenhofer C., Núñez Ferrer J., Catuti M., Kustova I., Rizos V., others. The European Green Deal after Corona: Implications for EU climate policy // *CEPS Policy Insights*. 2020. No. 2020/06. Pp. 1–12.
46. Gulev S.K. Global climate change and the world ocean // *Forecasting Problems*. 2023. No. 6, 2023. Pp. 25–36. DOI:10.47711/0868-6351-201-25-36.
47. Solovyev D.A., Morgunova M.O. Integrated development of the Russian Arctic: climate challenges, transport corridors, and new energy technologies // *Energy Policy*. 2018. No. 4. Pp. 89–98.
48. Bushuev V.V., Gabderakhmanova T.S., Morgunova M.O., Nefedova L.V., Solovyev D.A. *Energy Infrastructure of the Arctic Zone of the Russian Federation*. Moscow: Shans Publishing House, 2019.
49. Ministry of Energy of the Russian Federation. *Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2050* [Electronic resource]. 2024.
50. Zemlyanov I.V. Current state of the marine environment monitoring system of the Russian Federation (review) // *Oceanological Research*. 2024. No. 2(52). Pp. 107–120.
51. Nefedova L.V., Solovyev D.A. Assessment of the global climate change impact on Fuel and Energy Complex infrastructure and adaptation opportunities in the Russian Arctic // *IOP Conference Series*. 2020. No. 606. P. 1040. DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012040.
52. Consultation Paper: “Climate Physical Risks: Approaches to Analysis and Recognition in the Financial Sector”. 2022.
53. Schaeffer R., Szklo A.S., De Lucena A.F.P., Borba B.S.M.C., Nogueira L.P.P., Fleming F.P., Troccoli A., Harrison M., Boulahya M.S. Energy sector vulnerability to climate change: A review // *Energy*. 2012. No. 1(38). Pp. 1–12.
54. Protection of the Arctic Marine Environment [Electronic resource]. 2025. URL: <https://pame.is/> (accessed: 19.11.2025).
55. Global Ocean Observing System (GOOS) [Electronic resource]. 2025. URL: <https://goosocean.org/> (accessed: 19.11.2025).
56. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., others. Taking climate model evaluation to the next level // *Nature Climate Change*. 2019. No. 2(9). Pp. 102–110.
57. Nefedova L.V., Solovyev D.A. Opportunities and risks of using renewable energy in supporting tourism in the Arctic // *Proceedings of the VI International Conference “Renewable Energy: Problems and Prospects” and the XII Young Scientists’ School “Current Problems of the Development of Renewable Energy Resources” named after E.E. Shpilrain*. 12–15 October 2020. 2020. Pp. 92–96. DOI:10.33580/2313-5743-2020-8-1-92-96.
58. Agafonova E.A., Beriozkin M.Yu., Bushuev V.V., Verezhenskaya P.S., Degtyarev K.S., Zalihanov A.M., Kolpakov A.Yu., Krinitsky M.A., Nefedova L.V., Pokazeev K.V., Saenko V.V., Sinyugin O.A., Solovyev D.A., Fedorova E.V., Fedorov V.M., Frolov D.M. *Climate Change and Energy*. Moscow: KDU Publishing, 2024.

Energy and Climate Tipping Points of the Ocean System: Risks and Uncertainties for the 21st Century

Sergey Gulev ^[0000-0002-4296-5121], Dmitry Solovyev ^[0000-0001-5591-3067]

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

Email: gul@sail.msk.ru; solovev@ocean.ru

Abstract. This article presents a systematic analysis of the tipping-point states of the ocean system and their potential implications for climate and energy security in the twenty-first century. The study examines the physical mechanisms underlying threshold transitions in large-scale ocean circulation, sea ice, and biogeochemical cycles, as well as their connection to global climate dynamics. Particular attention is given to the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), the degradation of Arctic sea ice, and threshold effects associated with ocean acidification and heat content. Using modern modelling tools (CMIP6, IAMs), scenario-based approaches, and early-warning indicators, the article assesses risks for the energy sector, including changes in wind and thermal resources, sea-level rise, increased frequency of extreme weather events, and infrastructure vulnerability. The results demonstrate that the nonlinear response of ocean subsystems may generate large-scale impacts on energy security, geo-economics, and international policy. The article proposes adaptation strategies for Russia's energy policy, including the development of monitoring systems, infrastructure modernization, integration of climate factors into strategic planning, and expansion of international cooperation. The findings highlight the need for an interdisciplinary approach to assessing climate risks and shaping a resilient energy strategy in the face of global change.

Keywords: oceanic tipping points, climate thresholds, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), Arctic sea ice, ocean biogeochemical cycles, climate risks, energy security, climate-energy modelling, energy policy, climate adaptation, scenario uncertainty, infrastructure vulnerability.

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0017).

УДК 91:332.1:630.0:620.9

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-67-91

EDN: LKROFD

Обзор проблем водообеспечения в засушливых регионах Юга России и возможной роли возобновляемой энергетики в их решении

^{1,2}Дегтярев Кирилл Станиславович^[0000-0002-1738-6320],
^{1,3}Нефедова Людмила Вениаминовна^[0000-0002-6022-0617],
^{1,4}Березкин Михаил Юрьевич^[0000-0002-6945-2131]

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

E-mail: ²kir1111@rambler.ru, ³nefludmila@mail.ru,
⁴mberezkin@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные проблемы водообеспечения в засушливых регионах Юга России, в том числе, в контексте изменений климата, демографической и социально-экономической ситуации в регионах, существующие и предполагаемые подходы к их решению, их достоинства и недостатки. Показано, что можно выделить две группы источников воды для аридных территорий с недостаточными ресурсами поверхностных вод – внешние и внутренние. К внешним источникам относится строительство каналов и трубопроводов, поставляющих воду с более обводнённых территорий, к внутренним – широкий спектр, включающий использованием местных подземных вод, аккумуляцию дождевой и снеговой воды в холодные и влажные сезоны, опреснение морской воды (на прибрежных территориях), извлечение воды из атмосферного воздуха. Показано, что, как правило, по отдельности ни один из этих источников не может решить задачу обеспечения территории водой в достаточной степени и, в то же время, без существенных инвестиционных и экстернатальных затрат, в связи с чем наиболее приемлемыми являются комбинированные варианты. Исследованы возможности использования возобновляемых источников энергии в водообеспечении, проведён обзор имеющихся на данный момент решений, связанных с добычей и транспортировкой воды, включающих солнечную, ветровую и гидроэнергетику.

Ключевые слова: Юг России, вода, водные ресурсы, каналы, водоводы, поверхностные воды, подземные воды, атмосферные воды, возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика, ветроэнергетика, солнечная энергетика.

1 Введение

Проблема дефицита воды в зонах семиаридного и аридного климата, в частности, в южных районах Европейской части России (Причерноморье (Новороссия), Крым, Предкавказье, Нижняя Волга, в несколько меньшей степени – Средняя Волга, Южный Урал и юг Западной Сибири), Казахстане и Средней Азии, существовала всегда. В последние годы она обостряется, что связано с рядом причин, имеющих региональную специфику.

Общим для всех фактором является текущее изменение климата, одно из следствий которого – усиление засухливости данных территорий, главным образом, в весенне-летний период [1, 2], когда потребность в воде наиболее остра. Это происходит на фоне некоторого увеличения количества осадков и речного стока в центральных и северных частях Русской (Восточноевропейской) равнины [3, 4] и разнонаправленных тенденций на севере Сибири [5-9].

В случае с новыми регионами России ситуация резко усугубляется боевыми действиями и их последствиями – выводом из строя или блокированием существовавших ранее систем водоснабжения. Острота проблемы для южных регионов России в целом усиливается, поскольку там сосредоточена существенная часть населения страны и большая часть производства сельскохозяйственной продукции в стране. На 1 января 2025 года общая численность населения Южного, Северо-Кавказского и Приволжского федеральных округов составила 55,3 млн., или 38% всего населения России¹. В 2024 году только на Южный федеральный округ пришлось 25% всего производства зерновых и зернобобовых культур в стране, а вместе с Приволжским и Северо-Кавказским округами – 56%².

Кроме того, южные регионы России являются ведущим объектом внутреннего туризма, значение которого в последние годы растёт, и с этим также связан рост потребностей в воде, особенно в тёплое время года.

В случае с Казахстаном и Средней Азией потребность в водных ресурсах растёт в связи с увеличением численности населения, в совокупности составляющего более 80 млн. в настоящее время (рост на 43,4% с 2000 по 2023 г.) с прогнозом роста до 113 млн. к 2050 году³.

В советский период в качестве основного способа обводнения южных регионов страны предполагался межбассейновый перенос части стока северных рек европейской части России – Печоры, Вычегды, Северной Двины, Онеги в Волгу. Также рассматривалась возможность переброски воды из бассейна Ладоги через

¹<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>

²https://agro-in.cap.ru/Content2022/orgs/GovId_106/obzor_otechestvennoj_zernovoj_otrasli.pdf

³<https://population.un.org/wpp/downloads?folder=Standard%20Projections&group=Most%20used>

озеро Ильмень и Западную Двину в Днепр. Для водоснабжения засушливых регионов Казахстана и Средней Азии рассматривался вариант переброски части стока сибирских рек – главным образом, Оби, также Иртыша и, возможно, даже Енисея.

Возвращение к рассмотрению этих проектов происходит в настоящее время; своего рода отправной точкой стало прошедшее 22 октября 2025 года в Институте водных проблем РАН заседание Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши», на котором была принята резолюция о необходимости тщательного изучения всех возможных вариантов реализации данных идей в наше время⁴. Информация об этом сразу вызвала взрывной рост выступлений и публикаций в СМИ на данную тему, преимущественно критических⁵. Основная часть критики в силу понятных причин политического и социально-экономического характера направлена на «среднеазиатский» проект. В настоящий момент идет дальнейшее обсуждение в данной теме в научной среде. Ряд экологов и гидрологов, опираясь на опыт подобных проектов в прошлом, считают, что идея с перебросом воды из Северной Двины и других рек, как с помощью строительства канала, так и при варианте прокладки трубопровода для речных вод, представляется проектом одновременно крайне экологически рискованным и очень сложно реализуемым, требующим огромных капиталовложений.

Отметим также, что Россия (СССР) – не единственная страна, где рассматривались подобные по масштабу проекты. Так, в Северной Америке в 1950-е – 1970-е годы существовал проект NAWAPA (North American Water and Power Alliance), предполагавший переброску вод Аляски и северо-запада Канады на юг – в засушливые зоны юго-запада США и севера Мексики [10]. Стоимость проекта переброски вод северных рек, включавшего систему каналов, подземных тоннелей, резервуаров, насосных станций, гидроэлектростанций на искусственных водных путях, в 1964 году была оценена в \$80 млрд., в 1979 году – уже в \$130 млрд. Примечательно, что в отечественных источниках указывается оценка «среднеазиатского» проекта в \$100 млрд., что, вероятно, сделано в привязке к американскому аналогу. Проект NAWAPA тоже не был реализован, но в период его проработки и практически одновременной работой советских специалистов над идеей переброски части стока северных рек существовал большой взаимный интерес разработчиков. Нельзя исключать, что и отказ от реализации проекта – также в обоих случаях, был сделан под взаимным влиянием.

Среди более «умеренных» вариантов обеспечения водой засушливых территорий юга России можно указать проект системы водоводов из горной части Северного Кавказа на расположенные севернее засушливые равнинные территории.

Другие варианты водоснабжения засушливых территорий опираются на местные водные ресурсы и могут включать:

- Использование подземных вод;

⁴<https://ecologyofrussia.ru/stories/uchenyy-rasskazal-dlya-kogo-vazhen-proekt-perebroski-sibirskikh-rek/>

⁵<https://mosregdata.ru/article/siberian-rivers-to-asia-20>; <https://runews24.ru/articles/19/11/2025/delo-trubachem-rossii-mozhet-auknutsya-proekt-razvorota-sibirskix-rek>; <https://topcor.ru/66264-opravdana-li-ideja-perebroski-vod-severnyh-rek-na-donbass.html>; <https://www.business-gazeta.ru/article/687836>; <https://smart-lab.ru/blog/1231645.php>.

- Сбор и накопление дождевой воды и снега, выпадающих в холодное и влажное время года (поздней осенью, зимой, ранней весной), в естественных и искусственных резервуарах;
- Опреснение морской воды (в случае с рассматриваемыми регионами речь может идти о воде Чёрного и Каспийского морей);
- Извлечение воды из атмосферного воздуха.

С большой вероятностью проблема будет решаться комбинированным способом, включая относительно «щадящие» варианты переброски воды извне и использование местных ресурсов. Во всех случаях может быть задействована энергия из возобновляемых источников; кроме того, возможна дополнительная генерация гидроэнергии на водоводах.

Целью данной работы является представление возможных вариантов использования ВИЭ для водоснабжения. Задачи работы – рассмотреть имеющийся опыт водоснабжения засушливых территорий, включая крупнейшие реализованные проекты водоводов и использования ВИЭ для их функционирования, и предложить возможные решения, в том числе, опирающиеся на разработки Научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

2 Крупнейшие системы водоводов в мире и в России

Основной методикой расчетов выбросов парниковых газов от отраслей животноводства являются статистические данные о поголовье скота, которые обобщаются в данных Федеральной службы государственной статистики (Росстат) в границах субъектов и муниципалитетов. Поголовье скота (численность животных) в муниципальных районах на конец года определялось по Базе данных показателей муниципальных образований Росстата [15]. Полученные значения были использованы для перевода данных о поголовье животных по состоянию на конец года в среднегодовое поголовье в соответствии с требованиями методических указаний IPCC (Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК) [16]. Поправочный переводной коэффициент для свиней составляет 1,013, согласно [9]. Учитывалась численность животных только производственного сектора, т.е. поголовье животных в хозяйствах всех категорий без учета хозяйств населения.

Проведенный нами анализ крупнейших систем обеспечения водой нуждающихся в ней территорий показывает, что идеи перебросок воды на большие расстояния для водоснабжения аридных территорий реализуются, в том числе, в крупном масштабе. В частности, можно указать водовод «Север-Юг» (North-South Carrier) в Ботсване⁶, Израильский национальный водовод⁷, канал Индиры

⁶<https://web.archive.org/web/20160303235720/http://www.ewisa.co.za/literature/files/ID107%20Paper107%20van%20der%20Walt%20M.pdf>

⁷ <https://web.archive.org/web/20181002192717/http://research.haifa.ac.il/~eshkol/kantorb.html>

Ганди (Сарасвати Рупа-Раджастхан) в Индии⁸, канал Иртыш-Карамай-Урумчи в Китае [11], «Великая рукотворная река» в Ливии⁹, канал Центральной Аризоны¹⁰ и Калифорнийский акведук¹¹ в США.

Широко используется транспортировка воды по трубопроводам. Наряду с действующими водоводами целый ряд проектируется в настоящее время – как новые, так и расширение или наращивание существующих систем.

Большой частью это комбинации подземных трубопроводов и открытых каналов с насосными станциями, резервуарами воды, системами водоподготовки, в некоторых случаях – гидроэлектростанциями.

В то же время, имеющиеся системы водоснабжения кардинально уступают по масштабам советскому проекту межбассейновой переброски части стока северных рек и американскому проекту NAWAPA, оставшимся нереализованными. Исключение представляет собой ливийская «Великая рукотворная река», как минимум, не уступающая по протяжённости планировавшимся сооружениям в рамках советского и американского проектов, но достоверность представленной в открытых источниках информации о ливийском проекте требует дополнительных проверок. Близок по масштабу реализованный, также советский, проект Каракумского канала – на данный момент крупнейшего в мире как по протяжённости и ширине, так и по объёму проходящей воды, но канал не является примером межбассейновой переброски – вода идёт самотёком, не требуя перекачки; кроме того, проблемами являются заиливание и большие потери воды.

В современной России также действует ряд крупных оросительных каналов (табл. 1) – на юге европейской части страны, в Нижнем Поволжье, на юге Западной Сибири. Источники воды в каналах – крупные реки юга России – Волга, Днепр, Дон, Кубань, Терек и их притоки; на юге Западной Сибири (Кулундинский канал) – Обь. Практически все крупные оросительно-обводнительные каналы современной России построены в советский период; в постсоветское время была достроена 4 очередь Большого Ставропольского канала (1999-2008); в настоящее время существуют проекты создания новых систем водоснабжения на юге европейской части России. Также в 2023 году введён в эксплуатацию протяжённый водовод Дон-Донбасс, а с 2006 года идёт реконструкция Донского магистрального канала.

⁸<https://daijiworld.com/index.php/news/newsDisplay?newsID=970353>.

⁹<https://web.archive.org/web/20200322002049/https://www.water-technology.net/projects/gmr/>;
<https://web.archive.org/web/20180614095722/https://news.nationalgeographic.com/news/2010/05/100505-fossil-water-radioactive-science-environment/>

¹⁰<https://www.cap-az.com/>

¹¹<https://web.archive.org/web/20070610203453/http://www.publicaffairs.water.ca.gov/swp/swptoday.cfm>

Таблица 1. Примеры крупнейших обводнительно-оросительных каналов и водоводов России и СССР

Субъект РФ или бывшая республика СССР	Канал	Назначение и местоположение. Краткое описание
Алтайский край	Кулундинский ¹²	Обводнение Кулундинской степи из р. Обь. Построен в 1973-1983 гг. Длина 182 км, пропускная способность 25 м³/с (0,8 км³ в год). 2 насосные станции, водоподъём на высоту 30 м. 82 гидротех. сооружения, в т.ч. 3 дюкера и акведук через р. Кулунду, 26 автодорожных мостов.
Волгоградская область - Казахстан	Палласовский ¹³	Обводнение из р. Волги (Волгоградского вдхр.) засушливых восточных районов Волгоградской области и Западного Казахстана. Построен в 1968-1974 гг. Длина более 100 км, с ответвлениями – более 200 км.
Дагестан	Имени Октябрьской революции [12, 13]	Обводнение и орошение прибрежных районов Дагестана из р. Сулак. Построен в 1921-1923 гг. Длина 140 км. Пропускная способность 20 м³/с (0,63 км³ в год).
Донецкая НР	Северский Донец – Донбасс [14]	Водоснабжение центральной части ДНР из р. Северский Донец. Построен в 1955-1978, реконструирован и расширен в 1979. Длина 133 км. Пропускная способность 43 м³/с (1,35 км³ в год). 107 км - традиционный наземный канал (дно 2—4 м, поверхность 30—40 м, глубина 6—30 м). Остальные 26 км - трубные мосты через две другие реки, ж/д полотно и балки. Трубный мост или дюкер – 2-3 трубы диаметром >2 м. с доп. насосным оборудованием. Также 4 насосных станции, поднимающие воду канала на 200 м (Донецкий кряж). Скорость течения воды 0,8 м/с. Пять резервных водохранилищ: общим объёмом 64 млн м³. В настоящее время де-факто не функционирует из-за боевых действий.
Казахстан	Иртыш – Караганда [15-17]	Орошение центрального Казахстана из Иртыша. Построен в СССР в 1962-1974. Длина 450 км. Ширина канала — 20—50 м, глубина — 5—7 м. 22 насосные станции подъёма (подъём на 418 метров), 14 водохранилищ. Пропускная способность канала от 76 м³/с в голове (2,4 км³ в год – 9% стока Иртыша у точки забора воды в Павлодаре) до 13 м³/с в конце. В среднем одна насосная станция перекачивает 18 м³/с, или 1,5 млн м³ в сутки (0,5 км³ в год)

¹² https://water-rf.ru/Водные_объекты/880/Кулундинский_магистральный_канал¹³ <https://gazeta-rassvet.ru/news/media/2018/8/30/voda-kak-mnogo-v-etom-slove/>

Субъект РФ или бывшая республика СССР	Канал	Назначение и местоположение. Краткое описание
Ростовская обл. – Донецкая НР	Водовод Дон-Донбасс ¹⁴	Водоснабжение Донбасса из р. Дон. Построен в 2022-2023. Длина 190 км, включает две ветки труб диаметром 1,2 м; пропускная способность 300 тыс. м³ в сутки; 8 насосных станций и 14 гидравлических резервуаров.
Ростовская обл.	Донской магистральный ¹⁵	Орошение юга Ростовской области из р. Дон (Цимлянское вдхр.). Построен в 1952-1958 гг.; с 2006 г. идёт реконструкция; её общая стоимость оценивается в 6-6,5 млрд. рублей. Длина 195 км. Вода по основному руслу идёт самотёком.
Саратовская обл. - Казахстан	Саратовский оросительно-обводнительный им. Е.Е. Алексеевского ¹⁶	Подача воды из Волги в Саратовскую и Волгоградскую обл. и в Казахстан. Построен в 1967-1972 гг. Длина 126 км. Расход воды у истока 112 м³/с (3,5 км³/год). 5 насосных станций, обеспечивающих подачу воды на высоту 92 м; пропускная способность 51 м³/с
Северная Осетия – Ставропольский край	Терско-Кумский [18]	Оросительный канал, передающий воду из р. Терек в р. Кума. Построен в 1952-1960 гг. Длина 150 км, пропускная способность до 200 м³/с, годовой расход до 2,7 км³, или 1/3 стока Терека. 7 постоянных насосных станций
Ставропольский край	Большой Ставропольский [19]	Водоснабжение центральной, северо-восточной и восточной частей края из рек Кубань, Терек и Кума. Четыре очереди строительства: 1957—1967; 1969—1975; 1974—1979; 1986—1992, далее 1999—2008. Общая длина 480 км, пропускная способность 1 очереди 180 м³/с (5,7 км³/с в год). Включает систему насосных станций и водохранилищ.
Туркменистан	Каракумский канал [20]	Орошение пустыни Кара-Кумы из Амударьи. Построен в СССР; строительство 1954-1988. Длина 1400 км, ширина до 200 м, глубина до 7,5 м. Расход воды в начале канала 600 м³/с (19 км³ в год); составляет 20%-25% стока Амударьи до забора воды каналом ¹⁷ . Вода идёт самотёком. Среднегодовой забор воды из канала 12-13 км³.

¹⁴ <https://regnum.ru/news/3823690>; <https://vskmo.ru/2023/02/13/18056/>

¹⁵ <https://rostovmelio.ru/presscenter/novosti/donskoy-magistralnyy-kanal-vtoraya-molodost/>; <https://rostov.rbc.ru/rostov/freenews/6666e4989a79477dc39ee927>; <https://south.vedomosti.ru/south/news/2025/05/13/1109763-kanala>.

¹⁶ <http://sarvodhos.ru/struktura/saratovskij-obvodnitelno-orositelnyj-kanal.html>

¹⁷ <https://meteojournal.ru/analitika-vodozabora-v-karakumskij-kanal-za-vegetacionnyj-period-2025-goda/>

Субъект РФ или бывшая республика СССР	Канал	Назначение и местоположение. Краткое описание
Херсонская область и Республика Крым	Северо-Крымский	Обводнение и орошение южных районов Херсонской области и степного Крыма из р. Днепр (Каховское водохранилище). Построен в 1961-1971 гг. Длина 400 км. Ширина в начале — 150 м., глубина — 7 м. Среднегодовой сток — 380 м³/с (12 км³). Пропускная способность до 500 м³/с (30 % стока Днепра в нижнем течении). Первая насосная станция (перекачивает воду на 9 м) построена в 2022 ¹⁸ . Также есть насосная станция (построена в 1984) на Соединительном канале – одной из веток (подъём воды на 82 м). Вода не поступала в 2015 – февраль 2022 гг. и с 2023 г.

Строительство каналов наиболее полно решает задачи обеспечения водой засушливых территорий, однако проблемой практически всех крупных оросительно-обводнительных систем являются большие потери воды на испарение (учитывая их прохождение по аридным территориям с экстремально высокими летними температурами) и фильтрацию и сопряжённое с этим сильное воздействие на окружающую экосистему (по разным данным, потери воды могут достигать до 50% от объёма забора воды); кроме того, проблемой становится обмеление рек и водоёмов ниже водозаборов. При этом, строительство больших каналов сопряжено с длительными сроками (до десятков лет) и большими инвестиционными затратами – порядка десятков млрд. \$ для систем протяжённостью 1000 км и более, а также высокими эксплуатационными затратами. Последние связаны, прежде всего, с расходом электроэнергии на работу насосных станций по перекачиванию воды на более высокие уровни, а также с очисткой русла канала.

Строительство же трубопроводов в настоящее время решает задачи, главным образом, обеспечения водой населения, а не поставок воды для сельского хозяйства и промышленности, требующих существенно больших объёмов.

3 Добыча воды из местных источников

Существует широкий спектр местных источников воды, в том числе, в аридных зонах со слабо развитой сетью поверхностных водотоков и водоёмов.

Среди них на первом месте по объёмам находится использование **подземных вод** (грунтовых, межпластовых, артезианских). Теоретически, запасы подземных вод велики. На Земле общий запас пресных подземных вод¹⁹ оценивается в 10,5 млн. км³. Общий запас вод литосферы на глубинах до 2 км оценён в 22,6 млн. км³,

¹⁸<https://vesti-k.ru/news/2022/03/26/inzhener-rasskazal-kak-rabotaet-pervaya-nasosnaya-stanciya-na-severo-krymskom-kanale/>

¹⁹ <https://bigenc.ru/c/vodnye-ob-ekty-537f90>

но он включает не только пресные, но и минерализованные воды [21]. Для сравнения, общие запасы пресной воды на поверхности (в пресных озёрах, водохранилищах, реках, болотах) на два порядка меньше – около 150 000 км³. Суммарное мировое водопотребление составляет около 4800 км³/год [22], из которых на сельское хозяйство приходится около 3000, на промышленность – порядка 1000, остальное – на коммунальное хозяйство и другое использование. Доля безвозвратного водопотребления при этом составляет в среднем 60–80% в сельском хозяйстве, 10–15% в коммунальном секторе и 5–15% в промышленности, будучи в целом выше именно на аридных территориях и в южных регионах.

В структуре мирового водопотребления по источникам на подземные воды приходится 25% всех вод, используемых для ирригации, и 50% вод для бытовых нужд²⁰, остальная часть водопотребления покрывается за счет поверхностных вод.

В России прогнозные ресурсы подземных вод оцениваются в 870 тыс. км³. Среднее потребление воды в стране [23] можно оценить в величину чуть больше 90 км³ в год при структуре, близкой к среднемировой: сельское хозяйство – 65–70%, коммунально-бытовые нужды – около 20% и 10–15% – промышленность.

Общий объём добычи подземных вод в России – порядка 22 млн. м³ в сутки²¹, что эквивалентно 8 км³ в год, или менее 10% всего водопотребления. Это существенно ниже мирового уровня, что связано с большими ресурсами поверхностных вод в России в целом, позволяющими эксплуатировать подземные запасы менее интенсивно. В структуре потребления подземных вод в России на хозяйственно-бытовые нужды приходится 40%, на промышленность – 17%, на орошение пашен и пастбищ – менее 3% (в основном наше сельское хозяйство использует для орошения поверхностные источники) и 40% – на другие цели.

Проблема, из-за которой подземные воды в структуре использования уступают поверхностным водам (не только в России, но и в целом в мире), очевидны – обеспечение подъёма подземных вод на поверхность сопряжено с высокими затратами на бурение, обустройство и обслуживание скважин и подъём воды при трудно предсказуемом результате и ограниченной пропускной способности по сравнению с наземными каналами и трубопроводами.

Запасы подземных вод распределены неравномерно, при этом их меньшее количество и большая глубина залегания более характерна именно для аридных территорий в силу того, что основным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки; также существенно различаются условия их залегания и качество воды. Следует добавить, что интенсивное выкачивание подземных вод приводит к ряду отрицательных геоэкологических последствий; отдельную проблему представляет также их техногенное загрязнение, делающее их непригодными для использования.

Аккумуляция воды из дождевых и снеговых осадков, выпадающих в холодные и влажные сезоны, с их последующим использованием в тёплое и сухое время года, на которое приходится основная часть сельскохозяйственного и большая часть бытового водопотребления, теоретически также является не менее, и даже более мощным источником воды, чем каналы.

²⁰ <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s>.

²¹ <https://bigenc.ru/c/rossiia-priroda-podzemnye-vody-82f172>

В частности, наши расчёты показывают, что для полного покрытия водопотребления в Крыму было бы достаточно всего 10% выпадающих над полуостровом осадков. Ежегодный объём водопотребления в Республике Крым и Севастополе составляет около 1 км³ (по данным за 2013 год оно составил менее 1 км³ без учёта потерь при транспортировке воды по Северо-Крымскому каналу²²). Среднегодовое количество осадков над полуостровом, выпадающих в в осенне-зимнее время – около 400 мм (с существенными различиями в разных частях полуострова), что, при площади Крыма более 25 тыс. км², превышает 10 км³.

Данный способ обеспечения водой засушливых территорий давно известен, в частности, в Крыму использовался ещё в античный период [24]; в других засушливых регионах это также было распространённой практикой ещё за тысячелетия до н.э. [25]. В настоящее время такая практика тоже существует в ряде стран, и есть планы её расширения, в частности, в Гане, Сенегале²³, Шри-Ланке, Боливии, Китае, США, Израиле. Сбор дождевой воды производится для сельского хозяйства, нужд городского бытового и коммунального водопотребления, а также решения обратной задачи – защиты от ливней и наводнений. В последнем случае, используется концепция «города – губки» (sponge city), в частности, в Китае, Германии, Нидерландах, где ключевую роль играют зелёные насаждения, включая зелёные крыши домов²⁴.

В то же время обеспечение большей части потребностей в воде крупного региона с помощью сбора атмосферных осадков трудно осуществимо из-за больших площадей и объёмов, требуемых для систем сбора и хранения воды и, соответственно, как высоких инвестиционных затрат, так и возможных конфликтов землепользования. Помимо этого, изъятие большого количества воды, выпадающей с осадками, очевидным образом ведёт к её недопоступлению в подземные горизонты и поверхностные водоёмы и водотоки. Однако в качестве локальных решений, работающих наряду с другими, этот способ представляется вполне приемлемым.

Один из примеров отечественного опыта – появившаяся в 2018 году в Ботаническом саду МГУ «Аптекарский огород» система сбора дождевой воды, анонсированная в качестве первой в России²⁵. Она размещена на крышах оранжерей общей площадью 2000 м². В течение сезона с крыш собирается до 80 м³ воды, далее стекающей по желобам в подземные резервуары. Система позволяет экономить до 20% воды для полива растений.

Опреснение морской воды на прибрежных засушливых территориях также является широко распространённой практикой и, теоретически, может рассматриваться как неограниченный источник. В настоящее время в мире работает около 22000 опреснительных заводов [26] в 177 странах, производящие в сумме 95 млн. м³ пресной воды в сутки [27, 28], или почти 35 км³ в год, что, однако, составляет менее 1% всего мирового потребления воды (см. выше), хотя в ряде стран составляют более существенную долю. Ведущие страны - ОАЭ, США, Ал-

²² https://istmat.org/files/uploads/62953/regiony_ukrainy_2013_chast_1.pdf

²³ <https://www.fao.org/newsroom/story/Harnessing-the-power-of-rain/ru>

²⁴ <https://habr.com/ru/articles/694414/>

²⁵ <https://plus-one.rbc.ru/ecology/sobirатели-dozhdya>

жир, Австралия и ряд других, за некоторыми исключениями, полностью или частично расположенные в засушливых зонах и испытывающие дефицит водных ресурсов в целом или в отдельных частях. Помимо США и Австралии, лидерами является группа ближневосточных государств, а в Европе – Испания.

Индустрия опреснения воды испытала экспоненциальный рост с 1970-х по 2020 г., когда суммарные производственные мощности в мире выросли практически с нуля до 90 млн. м³ в сутки, который к настоящему времени вышел на плато. Основные проблемы, связанные с опреснением – высокие энергетические и финансовые затраты, связанные с опреснением: на получение 1 м³ воды при традиционных технологиях (выпаривания и обратного осмоса) затрачивается 10-15 кВтч электроэнергии²⁶, а стоимость [26] полученного 1 м³ воды варьируется в пределах \$0,14-2,46; в среднем около \$1. Для сравнения, если допустить, что все потребности человечества в воде (более 4000 км³ в год, см. выше) обеспечиваются за счёт опреснения морской воды, это обходилось бы в \$4 трлн. (\$500 на душу населения в год), или почти в 4% текущего мирового ВВП.

Экологический аспект связан с проблемой утилизации концентрированного рассола, остающегося после производства пресной воды. Наконец, технологическая составляющая проблемы связана с быстрым загрязнением и износом оборудования, работающего в агрессивной среде, что, в свою очередь, означает дополнительное увеличение затрат на производство.

В России имеется собственная история идей, разработок и их реализации. Так, в 1972 году была построена первая в мире опреснительная установка на атомной энергии в г. Шевченко Казахской ССР (ныне г. Актау в Республике Казахстан)²⁷ на базе Мангистауского атомного энергокомбината. Для работы атомного опреснителя использовался реактор БН-350 (реактор на быстрых нейтронах) тепловой мощностью 1000 МВт и электрической мощностью 350 МВт. На установке опреснялось 120 000 м³ в сутки, что позволяло обеспечивать водой город и местное сельское хозяйство. Реактор был выведен из эксплуатации Республикой Казахстан в 1999 году в связи с тем, что потенциально на нём мог нарабатываться оружейный плутоний²⁸. В настоящее время Казахстан стал лидером среди постсоветских государств по опреснению морской воды, хотя и на основе импортных технологий и оборудования. Один из примеров – завод «Кендирли» в Мангистауской области, запущенный в эксплуатацию в июле 2025 года, работающий на технологии обратного осмоса и рассчитанный на производство 50 000 м³ пресной воды в сутки²⁹.

В России на данный момент опреснение морской воды не стало масштабным, хотя существуют НИОКР и проекты в этой сфере, включая проекты опреснения воды в Крыму (на стадии обсуждения и экспериментальных установок) и на Каспии (получение пресной воды для жилого модуля буровой платформы Лукойл), проекты опреснения на базе атомного оборудования Росатома; также суще-

²⁶https://www.osmos.ru/blog/opresnenie_morskoy_vody:_analiz_sovremennykh_vyzovov_i_perspektiv.html

²⁷<https://историяросатома.рф/tpost/rela8eu5v1-pervaya-v-mire-atomnaya-ustanovka-dlya-o>

²⁸ <https://strana-rosatom.ru/2020/09/16/kaspijskij-obereg-kak-sozdavalas-pe/>

²⁹<https://forbes.kz/articles/opresnyat-morskuyu-vodu-kaspiya-nachali-na-novom-zavode-v-mangistauskoy-oblasti>

ствуют отечественные производства оборудования для опреснительных установок и установок «под ключ». Не менее важно в аридных и семиаридных условиях опреснение минерализованных подземных вод – в данном направлении также ведутся исследования.

Извлечение воды из атмосферного воздуха также можно рассматривать в качестве потенциального источника водообеспечения. Объёмное количество воды (в виде водяного пара) в приземных слоях воздуха колеблется от $2 \times 10^{-5}\%$ в Антарктиде до 3% в тропиках³⁰. При характерных для аридных зон летних температурах 30°C и относительной влажности воздуха 40% количество водяного пара в воздухе составляет 12,7 г/м³. Для данных территорий характерны резкие суточные перепады температур – в рамках суточного хода возможен и даже типичен перепад от 40°C во второй половине дня до 10°C на рассвете. Как следствие, способность воздуха удерживать водяной пар резко снижается, и он осаждается на поверхности почвы в виде росы. Водяной пар из атмосферы является важным и даже недооценённым источником воды для аридных экосистем [29]. Возможно искусственное извлечение влаги из атмосферного воздуха, если на его пути установить препятствие с менее высокой температурой. При скорости ветра 3 м/с и содержании водяного пара 10 г/м³ через поперечное сечение в 1 м² всего за 1 час пройдёт более 10 кг (10 л) воды, которая может быть уловлена. За сухой весенне-летний сезон эта величина составит уже более 40 000 литров, что эквивалентно среднему душевому бытовому водопотреблению (исходя из 200 литров в сутки).

Разработки по данной тематике НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова проводила одной из первых в мире. Разработчиками были получены следующие патенты:

- RU 2056479 C1 Установка для получения пресной воды из влажного воздуха, 1993 г. (авторы В.В. Алексеев, К.В. Чекарев);
- RU 2131000 C1 Установка для получения пресной воды из атмосферного воздуха, 1999 г. (авторы В.В. Алексеев, Н.А. Рустамов, К.В. Чекарев);
- RU 2149957 C1 Установка для интенсификации росообразования и сбора росы, 2000 г. (авторы В.В. Алексеев, И.В. Алексеев И.В., Н.А. Рустамов).

Установка «Роса» НИЛ ВИЭ для сбора росы производительностью до 20 м³ в сутки была создана и успешно прошла испытания в 1999-2002 гг. на территории Института экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун» в Обнинске [30].

Существуют и другие отечественные и зарубежные разработки. В России это, в частности, разработки Южного Федерального университета по созданию высокоэффективных сорбентов воды из воздуха³¹ и РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина³², также связанную с созданием эффективных сорбентов, система «Воздушный родник» С.С. Доржиева (Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ)³³, основанная на использовании вихревой энергетики. Среди последних

³⁰ <https://gufo.me/dict/bse/Атмосфера>

³¹ <https://sfedu.ru/press-center/news/74129>

³² <https://www.techinsider.ru/news/news-1717631-v-rossii-sozdali-deshevuyu-i-ekologichnuyu-ustanovku-dlya-polucheniya-vody-iz-vozduha/>

³³ <https://ecotechproduct.ru/tehnologii-i-innovacii-federalnogo-nauchnogo-agroinzhenernogo-centra-vim/post/ekstraktor-atmosfernoj-vlagi-vozdushnyj-rodnik?ysclid=mjbk4txpa103661353>

зарубежных разработок можно отметить комплекс, созданный китайской компанией AtmosWell (Шанхай)³⁴.

Технологии извлечения воды из воздуха пока не получили широкого практического применения. По объёму производства воды он уступает другим потенциальным источникам, а его широкое использование может иметь свои очевидные отрицательные последствия для аридных экосистем (вопрос требует дополнительных исследований), хотя он может рассматриваться в качестве наиболее дешёвого и экологически безопасного способа водоснабжения, оптимального в определённых ситуациях, связанных с точечным водоснабжением небольших потребителей, а также как дополнительный автономный источник водоснабжения домохозяйств.

4 Использование ВИЭ в системах водоснабжения

Возможности использования ВИЭ в системах водоснабжения обусловлены, с одной стороны, потребностями в электроэнергии для обеспечения добычи и транспортировки воды, которые могут быть удовлетворены, в том числе, за счёт энергоустановок, работающих на основе возобновляемой энергии, с другой стороны – наличием возобновляемых энергоресурсов на данных территориях. В аридных и семиаридных зонах ресурсы солнечной энергии значительны, при этом максимальное поступление солнечной энергии происходит именно в сезон максимальной потребности в воде и её минимального естественного поступления.

При этом южные территории России характеризуются развитым сельским хозяйством и, как следствие – большим биоэнергетическим потенциалом, связанным с его отходами, в наибольшей степени – отходами растениеводства [31]. Использование биоэнергетических ресурсов возможно для генерации как тепловой, так и электрической энергии.

Хотя в большинстве случаев для аридных и семиаридных зон характерны низкие значения ветровой энергии в силу преимущественного положения во внутриконтинентальных областях с господством антициклонов в летнее время, отдельные территории отличаются высокими скоростями ветра. Это береговые зоны морей и крупных рек, возвышенные участки, отдельные зоны со специфическими аэродинамическими условиями. На юге европейской части России это берега Чёрного, Азовского и Каспийского морей, Волги и Дона в нижнем течении, водораздельные поверхности Донецкого кряжа, южных частей Среднерусской и Приволжской возвышенностей, возвышенность Ергени, Ставропольская возвышенность, внутренние части Крымских гор, Кумо-Манычская впадина, являющаяся «естественной аэродинамической трубой» между Каспийским и Чёрным морем.

Таким образом, особенности географического положения и рельефа южного региона России делают существенную часть его территории благоприятной для

³⁴ <https://www.chinadaily.com.cn/a/202512/01/WS692ce9fca310d6866eb2c315.html>

развития ветроэнергетики. Отметим, что именно юг европейской части России отличается на данный момент наиболее развитой солнечной и ветровой энергетикой (на Южный и Северо-Кавказский федеральные округа по состоянию на 2025 год приходилось около 80% всех ветроэнергетических и 50% фотоэлектрических мощностей России; в сумме более 3000 МВт), с учётом предгорных и горных территорий Кавказа – также малой гидроэнергетикой; в отношении этого региона можно говорить о начальной стадии формирования в нём производственного кластера возобновляемой энергетики с элементами вертикальной интеграции – включая не только электростанции, но и производства оборудования для солнечной и ветровой энергетики [32].

Основные потенциальные точки приложения возобновляемой энергии – насосы для перекачивания воды, транспортируемой по каналам и трубопроводам, на водоразделы, и подъёма подземной воды из скважин. Далее при транспортировке по водоводам вода, идущая вниз самотёком с водоразделов, может быть использована для малых и микро-ГЭС; таким образом, затраты энергии для перекачивания её вверх частично компенсируются, а водные резервуары на водоразделах выполняют также функцию гидроаккумулирующих станций.

Установки для опреснения морской и минерализованной подземной воды также могут работать на ВИЭ. В системах извлечения воды из атмосферного воздуха также могут быть установлены электродвигатели, работающие на ВИЭ, для охлаждения принимающей воздух поверхности и форсирования проходящих через улавливающие устройства потоков воздуха. Опыт и новые разработки, связанные с использованием ВИЭ в системах водоснабжения, существуют в ряде стран мира, в том числе в России.

Использование ВИЭ в водообеспечении может иметь и дополнительные положительные эффекты. В частности, исследования, проведённые для Калифорнийского акведука, показали, что, с одной стороны, эффективность солнечных батарей вблизи канала повышается благодаря более прохладному микроклимату; с другой – при размещении панелей над каналом благодаря затенению снижается испарение воды из канала на 39 ± 12 тыс. м³ на каждый 1 км его протяжённости [33]. Кроме того, затенение препятствует зарастанию канала. Расчёты показали, что дополнительные затраты, связанные с опорными конструкциями и кабелями при размещении солнечных панелей над каналом, компенсируются как ростом производительности батарей, так и экономией воды, в итоге приводя к положительному финансовому результату. При этом, солнечные батареи обеспечивают работу насосов, прокачивающих воду по каналу.

Аналогичный опыт есть в Индии, где построен ряд «солнечных каналов» (рис.1).



Рис.1. Примеры размещения солнечных панелей над каналами (Индия, штат Пенджаб, каналы Сидхван у г. Дорада и Гхаггар в районе Нидампур)³⁵

В качестве гипотезы можно предположить, что определённый эффект уменьшения испарения воды с поверхности канала возможен и при установке ветрогенераторов за счёт вихревого движения. Сотрудниками НИЛВИЭ проводились разработки для испарительных градиентных АЭС, где создание вихревого движения над поверхностью воды способствовало её охлаждению [34]. Однако вопрос, насколько достижим подобный эффект при работе лопастей ветрогенератора, а также, насколько вихревые системы охлаждения могут быть эффективны для снижения испарения с поверхностей каналов, требует отдельного исследования.

Привлечение ВИЭ (прежде всего, солнечной и ветровой энергии) для подъёма воды из скважин на поверхность также расширяется в последние десятилетия. В качестве некоторых отечественных примеров можно указать разработки МЭИ [35] и Федерального агроинженерного центра ВИМ, связанные с солнечными водоподъёмными установками [36].

Существуют разработки, находящие практическое применение, по обеспечению работы опреснительных установок на возобновляемой энергии. Первые из них, в частности, связанные с обеспечением работы мембранных опреснителей за счёт солнечной энергии, появились более 20 лет назад [37, 38]. Тема получила продолжение с развитием технологий; в качестве источников энергии используются как фотоэлектрические установки, так и солнечные концентраторы [39, 40]. Одна из новых разработок – китайско-американская установка, имитирующая принцип термохалинной циркуляции в океане и способная работать исключительно на солнечном свете [41], т.е. практически без затрат. Существуют и оригинальные отечественные решения. В частности, исследователи из Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) разработали программное обеспечение, с помощью которого возможно опреснение морской и минерализованной подземной воды с использованием побочного тепла, выделяемого в процессе работы солнечными батареями и ветрогенераторами.

Отдельное направление – использование ВИЭ, в частности, солнечной энергии, для автоматических систем полива. В России разрабатываются передвижные фотоэлектрические установки для орошения [42]. В 2024 году в Узбекистане (Аккурганский район Ташкентской области) была запущена система капельного орошения, работающая на солнечной энергии³⁶.

³⁵ <https://www.peda.gov.in/solar-canals-built-in-sidhwan-and-ghaggar>

³⁶ <https://www.undp.org/ru/uzbekistan/press-releases/es-i-proon-zapustili-sistemu-kapelnogo-orosheniya-na-solnechnykh-batareyakh-dlya-mestnykh-domokhozyaystv>

Приведённое выше – отдельные примеры широкого к настоящему времени использования ВИЭ в системах водоснабжения и ирригации, включающего солнечную и ветровую энергию, в отдельных случаях – биоэнергию и геотермальную энергию.

Гидроэнергетика на искусственных водотоках, включая обводнительно-оросительные каналы, на основе малых и микро-ГЭС также стала широко распространённой мировой практикой. В России это направление также давно существует и развивается (табл. 2).

Таблица 2. Действующие ГЭС на обводнительно-оросительных каналах России³⁷

Канал	ГЭС	Мощность, МВт
Большой Ставропольский	Кубанские ГЭС (-1, -2, -3, -4)	386
	Просьянская	7
	Барсучковская	5
Невинномысский	Сенгилеевская	15
	Свистухинская	12
Терско-Кумский	Горько-Балковская	9
Баксан - Малка	МГЭС-3	4
Малка - Кура	Орловская	2
Акбашский	Акбашская	1

В то же время, большинство ГЭС, включая крупнейшие, построены ещё в советский период, а гидроэнергетический потенциал каналов остаётся в значительной степени неиспользованным. Так, исследователи из Российского НИИ проблем мелиорации выявили более 30 перспективных створов для устройства малых и микро-ГЭС только на оросительных системах Ставропольского края суммарной мощностью почти 130 МВт с потенциальной выработкой электроэнергии более 500 млн. кВтч в год [43].

Дополнительным доводом в пользу расширения использования ВИЭ в системах водоснабжения могут являться менее жёсткие требования к стабильности выработки. В период избыточной выработки ветровые и солнечные агрегаты могут работать на закачивание воды в резервуары и водохранилища на водоразделах, через которые проходят водоводы, а в период солнечного или ветрового дефицита он может компенсироваться за счёт работы ГЭС, расположенных ниже. Ранее нами проводились расчёты потенциальной выработки водорода за счёт работы электростанций на основе ВИЭ в России [44, 45]; производство водорода может рассматриваться как аккумулирование энергии, компенсирующее нестабильность её выработки солнечными и ветровыми электростанциями. Аналогичным образом можно рассматривать использование ветровых и солнечных электростанций для закачивания воды в резервуары в оросительно-обводнительных

³⁷<https://rushydro.ru/>, <https://hydropower.ru/hydropower/stations/>, <https://energybase.ru/>

системах. Соответствующие расчёты являются задачей следующих этапов работы. Отметим также, что на аридных и семиаридных территориях юга России для обслуживания обводнительно-оросительных систем могут быть использованы и уже построенные солнечные и ветровые электростанции.

5 Выводы

1. Выполненный аналитический обзор открытых литературных источников по прогнозируемой проблеме возможного роста дефицита водных ресурсов на юге европейской части России, Урала и Западной Сибири и в Средней Азии показал, что для ее решения рассматривается ряд вариантов, наиболее масштабными из которых является межбассейновая переброска части стока северных рек: Печоры, Северной Двины, Вычегды в Волгу и Оби в Казахстан и Среднюю Азию. Однако разработки и расчёты предыдущих лет и последствия реализации проектов протяжённых (от сотен до более 1000 км) открытых каналов показывают спорность таких решений, как с экономической, так и с экологической точки зрения. Экологически более безопасным вариантом представляются трубопроводы, хотя в настоящее время по ним возможны поставки воды в значительно меньших объемах, нежели по каналам.
2. Наряду с поставкой воды извне существует ряд местных потенциальных источников: глубинные воды (грунтовые, межпластовые, артезианские), опреснение морской (на побережьях) и минерализованных глубинных вод, накопление в резервуарах воды, выпадающей с атмосферными осадками, в осенне-зимнее время, а также извлечение воды из атмосферного воздуха. Каждый из этих вариантов, теоретически, способен решить проблему водообеспечения, но на практике для всех них также существуют ограничения технологического и экологического характера. В связи с этим представляется разумным сочетание разных способов обеспечения водой, как из внешних, так и из внутренних источников, с учётом специфики региона.
3. Практически во всех вариантах и на всех стадиях процесса водообеспечения могут быть задействованы возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их основная функция – выработка электроэнергии для работы: 1) насосных станций, перекачивающих воду по водоводам на более высокие гипсометрические уровни и поднимающих подземную воду из скважин на поверхность, 2) опреснительных установок, 3) установок для извлечения воды из атмосферного воздуха. Использование ВИЭ (гидравлической, солнечной, ветровой, в отдельных случаях био- и геотермальной энергии) для этих целей является перспективной практикой, получающей всё более широкое распространение в мире. Также перспективным является строительство МГЭС на нисходящих участках искусственных водоводов. Выработка на них электроэнергии компенсирует энергетические затраты на подъём воды, а резервуары, расположенные на водоразделах в обводнительно-оросительных системах, выполняют при этом также функции гидроаккумулирующих станций.

4. Использование ВИЭ может обеспечить и ряд побочных положительных эффектов. Например, установка солнечных панелей над поверхностью открытого канала способствует их более эффективной работе (за счёт охлаждения PV модулей) и одновременно существенно снижает испарение с поверхности канала за счёт затенения, что в сумме компенсирует дополнительные затраты на опорные конструкции и кабели. Такие решения способны частично сглаживать отрицательные побочные эффекты, связанные с протяжёнными открытыми каналами.
5. Аридные и семиаридные территории юга России обладают значимыми предпосылками для использования ВИЭ в системах обводнения и орошения в силу высокого потенциала солнечных, ветровых, биоэнергетических (отходы сельского хозяйства) и гидроэнергетических (на прилегающих предгорных территориях) ресурсов, а также текущего состояния развития возобновляемой энергетики – в регионе уже возведено несколько гигаватт мощностей ВИЭ, включая гидравлические, солнечные и ветровые электростанции, которые могут быть задействованы в системах обводнения и орошения. Потенциал использования гидроэнергии на искусственных водотоках и других возобновляемых источников энергии реализован на данный момент в небольшой степени. Детальные расчёты потенциала ВИЭ, потребностей в дополнительных мощностях для систем обеспечения водой и экономического эффекта использования ВИЭ, а также выбор оптимальной конфигурации источников воды для разных территорий требуют значительного объема комплексных исследований специалистов разных профилей и являются задачами дальнейших этапов исследования.

Литература

1. Кузьмина Ж. В., Трешкин С. Е. Климатические изменения в Приаралье и Средней Азии // Аридные экосистемы. 2016. №4 (69), с. 5-20.
2. Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Климатические изменения на юге России: тенденции и возможности прогноза // Научный журнал КубГАУ. 2015. №111 (07) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-izmeneniya-na-yuge-rossii-tendentsii-i-vozmozhnosti-prognoza> (дата обращения: 27.11.2025)
3. Крышнякова О.С., Малинин В.Н. К оценке трендов в колебаниях осадков на европейской территории России // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 1. С. 64—69;
4. Лавров Н.А. Многолетние колебания температуры, осадков и характеристик циркуляции атмосферы на севере европейской части России. // Вестник СПбГУ, Сер.7, 2006, вып.1, с.139-142
5. Марчук Н.А., Куленцан А.Л. Анализ особенностей состояния климата в России. // Economics. 2020. №4 (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osobennostey-sostoyaniya-klimata-v-rossii> (дата обращения: 03.12.2025)
6. Волков М.А., Огурцов Л.А. Пространственно-временная структура экстремальных годовых значений температуры воздуха и атмосферных осадков на севере Западной

- Сибири // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. №1 (2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvenno-vremennaya-struktura-ekstremalnyh-godovyh-znacheniy-temperatury-vozduha-i-atmosfernyh-osadkov-na-severe-zapadnoy> (дата обращения: 03.12.2025)
7. Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. №1. с.3-13.
 8. Переведенцев Ю.П., Важнова Н.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М., Шарипова Р.Б. Современные тенденции изменения климата в Приволжском федеральном округе. // Георесурсы. 2012. №6(48), с. 19-23.
 9. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель европейской территории России // Известия РАН. Серия географическая. 2022, том 86, №1, с. 98-108.
 10. Собисевич А. В. «Если почвовед почему-то нельзя включить в делегацию, просим физика или химика»: советские проекты преобразования природы и их презентация за рубежом // Вестн. Перм. ун-та. Сер. История. 2022. №4 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/esli-pochvoveda-pochemu-to-nelzya-vklyuchit-v-delegatsiyu-prosim-fizika-ili-himika-sovetskie-proekty-preobrazovaniya-prirody-i-ih> (дата обращения: 04.12.2025)
 11. Терехов А. Г. Технические характеристики водного канала Кара-Ертис – Урумчи: спутниковые оценки // Гидрометеорология и экология. 2018. №4 (91). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-harakteristiki-vodnogo-kanala-kara-ertis-urumchi-sputnikovye-otsenki> (дата обращения: 05.12.2025)
 12. Гаджиев Х. И. Строительство канала имени Октябрьской революции, его значение для социально-экономического развития Северного Дагестана // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Общественные науки. 2007. №1, с.32-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelstvo-kanala-imeni-oktyabskoy-revolutsii-ego-znachenie-dlya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-severnogo-dagestana> (дата обращения: 11.12.2025)
 13. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 3. Дагестан / под ред. П. П. Буртовой. — Л.: Гидрометеиздат, 1964. — 76 с.
 14. Жук Г. П. Северский Донец — Донбасс. Издательство «Донбасс», Донецк, 1982.
 15. Грин Г. Б., Демин А. П., Федоров Б. Г. Канал Иртыш — Караганда. Водохозяйственные, социально-экономические и экологические аспекты. М.: Наука, 1987.
 16. Грин Г.Б., Демин А.П., Никольский Н.Б., Федоров Б.Г., Литвинюк А.Ф. Народно-хозяйственная эффективность канала Иртыш-Караганда // Мелиорация и водное хозяйство. 1988. N3. С. 9-12
 17. Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И. Оценка многолетней динамики водного стока верхнего Иртыша в целях устойчивого природопользования // Вестник Томского государственного университета. – 2014. - №379, с. 189-195
 18. Долгушев И.А. . Оросительные и обводнительные системы в СССР. М., м-во мелиорации и водного хоз-ва СССР. Главводпроект. Всесоюз. гос. проектно-изыскательский и науч.-исслед. ин-т «Гипроводхоз», 1968.

19. Собисевич А. В., Широкова В. А. Большой Ставропольский канал — обводнительно-оросительная система Северного Кавказа // Грозненский естественнонаучный бюллетень. — 2018. — Т. 3, № 1 (9). — С. 81-89.
20. Граве М.К. Каракумский канал и природа пустыни / М. К. Граве, Л. М. Граве. - Москва : Знание, 1981. - 48 с. : ил.; 20 см. - (Новое в жизни, науке, технике).
21. Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E. & Cardenas, M. B. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nat. Geosci.* **9**, 161–167 (2016).
22. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Оценка современного водопотребления в мире и на континентах, его влияние на годовой речной сток // Вестник РАН, 2022, Т. 92, № 3, стр. 256-264.
23. Якуцени С.П. Вода: ресурсы, запасы, рынки. Горная промышленность. 2022;(4):120–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-120-128>.
24. Берёзкин М. Ю. Исторические типы природопользования на примере Крыма. — ИД Энергия Москва, 2020. — 128 с.
25. Bessah, E.; Donkor, E.; Raji, A.; Taiwo, O.; Ololade, O.; Strapasson, A.; Amponsah, S.; Agodzo, S. Factors affecting farmers' decision to harvest rainwater for maize production in Ghana. *Front. Water* 2022, 4, 966966.
26. Eke J., Yusuf A., Giwa A., Sodiq F. The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*. Vol.495, 2020, 114633. ISSN 0011-9164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
27. Connecting People and Ideas to Sustainable Water Solutions for Over 50 Years. Retrieved December 2, 2025.
28. Jones, Edward; Qadir, Manzoor; van Vliet, Michelle T. H.; Smakhtin, Vladimir; Kang, Seong-mu (2019-03-20). "The state of desalination and brine production: A global outlook". *Science of the Total Environment*. **657**: 1343–1356.
29. McHugh, T., Morrissey, E., Reed, S. *et al.* Water from air: an overlooked source of moisture in arid and semiarid regions. *Sci Rep* **5**, 13767 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep13767>
30. Соловьев А. А. Возобновляемый водный ресурс атмосферы – источник пресной воды // Возобновляемая и малая энергетика-2016. — Т. 13. — Комитет ВИЭ РосСНИО Москва: 2016. — С. 371–379.
31. Андреев Т.И., Дегтярев К.С., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. География биоэнергетических ресурсов России // Окружающая среда и энерговедение. – 2025 - №3 – с. 4-23.
32. Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Территориальная организация возобновляемой электроэнергетики России // Окружающая среда и энерговедение. – 2024. - №1, с. 36-50.
33. McKuin, B., Zumkehr, A., Ta, J. *et al.* Energy and water co-benefits from covering canals with solar panels. *Nat Sustain* **4**, 609–617 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00693-8>
34. Соловьев А. А., Чекарев К. В. Башенная испарительная градирня с внешним теплообменом // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). — 2014. — № 25. — С. 1–7.
35. Бенамер А., Виссарионов В.И. Солнечная водоподъемная установка (СВУ) для водоснабжения автономных потребителей. Техника и технология. 2007; (1): 32–35. <https://www.elibrary.ru/judgsx>

36. Юфеев Л.Ю. Повышение эффективности работы солнечной водоподъемной установки для орошения в условиях переменной облачности // *Аграрная наука*. – 2023 - №7 – с. 134-137
37. Koschikowsky J., Wiegghaus M., Rommel M. Solar-powered membrane desalination plants based on membrane distillation. *Desalination* 156 (2003), 295-304.
38. Lotfy, H.R., Staš, J. & Roubik, H. Renewable energy powered membrane desalination — review of recent development. *Environ Sci Pollut Res* 29, 46552–46568 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20480-y>
39. Selvi S. R., Baskaran R. Solar Photovoltaic-powered Membrane Distillation as Sustainable Clean Energy Technology in Desalination. October 2015. *Current Science* 109(7):1247. DOI: 10.18520/v109/i7/1247-1254
40. Elfaqi, A.K., Elbaz, A. & Akash, Y.M. A review of solar photovoltaic-powered water desalination technologies. *Sustain. Water Resour. Manag.* 10, 123 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01067-6>
41. Gao, Jintong et al. Extreme salt-resisting multistage solar distillation with thermohaline convection *Joule*, Volume 7, Issue 10, 2274 – 2290. October 18, 2023
42. Метлов Г.Н., Королев В.А., Беленов А.Т. Передвижные солнечные фотоэлектрические водоподъемные установки для орошения // *Вестник аграрной науки Дона*. 2016. №33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/peredvizhnye-solnechnye-fotoelektricheskie-vodopodemnye-ustanovki-dlya-orosheniya>
43. Щедрин В.Н., Бакланова Д.В., Бондаренко В.Л., Лобанов Г.Л. Оценка перспектив использования малой гидроэнергетики на оросительных системах для обеспечения внутрисистемных потребностей в электроэнергии // *Мелиорация и гидротехника (Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации)*. 2017. №3 (27), с. 160-178.
44. Estimation of wind energy resources in regions of Russia for green hydrogen production and reduction of CO2 emission / L. V. Nefedova, K. S. Degtyarev, S. V. Kiseleva, M. Y. Berezkin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2022. — Vol. 988, no. 3. — P. 032023
45. Prospects for green hydrogen production in the regions of Russia / L. Nefedova, K. Degtyarev, S. Kiseleva, M. Berezkin // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 265, no. APEEM 2021. — P. 04011.

References

1. Kuz'mina J.V., Treshkin S.E. Climate changes in Aral region and in Central Asia (in Russ.). *Arid ecosystems*, 2016, 4(60), 5-20.
2. Rybak O.O., Rybak E.A. Climate changes in the South of Russia: tendencies and forecast possibilities (in Russ.). *Sci. jour. of KubSAU*, 2015, 111 (07). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-izmeneniya-na-yuge-rossii-tendentsii-i-vozmozhnosti-prognoza> (access: 27.11.2025)
3. Kryshnyakova O.S., Malinin V.N. On the trend evaluation for the precipitation fluctuations in the European territory of Russia (in Russ.). *IKBFU's Vestnik*, 2010, vol. 1, 64—69.

4. Lavrov N.A. Long-term fluctuations in temperature, precipitation, and atmospheric circulation characteristics in the North of the European part of Russia (in Russ.). *Vestnik of Saint Petersburg University*, ser. 7, 2006, vol. 1, 139-142
5. Marchuk N.A., Kulentsan A.L. The analysis of features state of the climate in Russia (in Russ.). *Economics*. 2020, (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osobennostey-sostoyaniya-klimata-v-rossii> (access: 03.12.2025)
6. Volkova M.A., Ogurtsov L.A. Spatio-temporal structure of extreme annual values of air temperature and precipitation in the Northern part of Western Siberia. (in Russ.). *Arctic XXI Century. Natural sciences*. 2015, 1(2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvenno-vremennaya-struktura-ekstremalnyh-godovyh-znacheniy-temperatury-vozduha-i-atmosfernyh-osadkov-na-severe-zapadnoy> (access: 03.12.2025)
7. Popova V.V., Matskovsky V.V., Mikhailov A.Yu. Recent climate change over the terrestrial part of extratropical Northern Hemisphere zone. (in Russ.). *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2018, 1, 3-13.
8. Perevedentsev Yu.P., Vazhnova N.A., Naumov E.P., Shantalinsky K.M., Sharipova R.B. Current trends in climate change in the Volga Federal District. (in Russ.). *Georesursy*. 2012, 6(48), 19-23.
9. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Role of spring-summer drought in the dynamics of aridization of arid lands in European Russia. (in Russ.). *Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Seriya Geograficheskaya*. 2022, vol. 86, 1, 98-108.
10. Sobisevich A.V. "If it is impossible to include a soil scientist in the delegation, please send a physicist or a chemist": Soviet projects for transforming nature and their presentation abroad. (in Russ.). *Perm University Herald. History*. 2022, 4 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/esli-pochvoveda-pochemu-to-nelzya-vklyuchit-v-delegatsiyu-prosim-fizika-ili-himika-sovetskie-proekty-preobrazovaniya-prirody-i-ih> (access: 04.12.2025)
11. Terekhov A.G. Technical characteristics of the Kara-Ertis – Urumqi water canal: satellite estimations. (in Russ.). *Gidrometeorologiya i ekologiya*. 2018, 4 (91). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-harakteristiki-vodnogo-kanala-kara-ertis-urumchi-sputnikovye-otsenki> (access: 05.12.2025)
12. Gadgiev Kh.I. Construction of the October Revolution Canal, its importance for the socio-economic development of Northern Dagestan (in Russ.). *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazsky region. Obshchestvennye nauki*. 2007, 1, 32-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelstvo-kanala-imeni-oktyabrskoy-revolutsii-ego-znachenie-dlya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-severnogo-dagestana> (access: 11.12.2025)
13. Surface water resources of the USSR: Hydrological study. (in Russ.): vol. 9. Transcaucasia and Dagestan. Iss. 3. Dagestan. Ed. Burtova P.P.. — L.: Gidrometeoizdat, 1964. — 76 p.
14. Zhuk G.P. Seversky Donets – Donbass. (in Russ.). Donbass edition, Donetsk, 1982.
15. Grin G.B., Demin A.P., Fedorov B.G. The Irtysh— Karaganda canal. Water management, socio-economic and environmental aspects (in Russ.). M.: Nauka, 1987.
16. Grin G.B., Demin A.P., Nikolsky N.B., Fedorov B.G., Litvinyuk A.F. National economic efficiency of the Irtysh-Karaganda canal (in Russ.). *Melioratsiya i vodnoye khozyaistvo*. 1988, 3, 9-12
17. Beysembaeva M.A., Dubrovskaya L.I. Estimation of water runoff perennial change of the upper Irtysh river for water resource stability. (in Russ.). *Tomsk State University Journal*. 2014, 379, 189-195

18. Dolgushev I.A. Irrigation and water supply systems in the USSR. (in Russ.). M., Ministry of irrigation and water management of USSR. Glavvodproekt. All-union state project-and-research institute Giprovodkhoz, 1968.
19. Sobisevich A.V., Shirokova V.A. Great Stavropol canal as waterway of North Caucasus (in Russ.). *Groznensky estestvennonauchnyy bulletin*. 2018, vol. 3, 1 (9), 81-89.
20. Grave M.K. Karakum canal and nature of the desert. (in Russ.). / Grave M.K., Grave L.M. - Moscow: Znanie, 1981. - 48 p.
21. Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E. & Cardenas, M. B. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nat. Geosci.* **9**, 161–167 (2016).
22. Koronkevich N.I., Barabanjva E.A., Zaitseva I.S. The geographical line in research of hydrological studies at the RAS Institute of Geography. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022, vol. 92, 3, 256-264.
23. Yakutseni S.P. Water: resources, reserves, markets. *Russian mining industry*. 2022;(4):120–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-120-128>.
24. Berezkin M. Yu. Historical types of environmental management on the example of Crimea. (in Russ.). — ID Energiya Moscow, 2020. — 128 p.
25. Bessah, E.; Donkor, E.; Raji, A.; Taiwo, O.; Ololade, O.; Strapasson, A.; Amponsah, S.; Agodzo, S. Factors affecting farmers' decision to harvest rainwater for maize production in Ghana. *Front. Water* 2022, 4, 966966.
26. Eke J., Yusuf A., Giwa A., Sodiq F. The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*. Vol.495, 2020, 114633. ISSN 0011-9164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
27. Connecting People and Ideas to Sustainable Water Solutions for Over 50 Years. Retrieved December 2, 2025.
28. Jones, Edward; Qadir, Manzoor; van Vliet, Michelle T. H.; Smakhtin, Vladimir; Kang, Seong-mu (2019-03-20). "The state of desalination and brine production: A global outlook". *Science of the Total Environment*. **657**: 1343–1356.
29. McHugh, T., Morrissey, E., Reed, S. *et al.* Water from air: an overlooked source of moisture in arid and semiarid regions. *Sci Rep* **5**, 13767 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep13767>
30. Soloviev A.A. Renewable water resource of the atmosphere as a source of fresh water. (in Russ.). *Vozobnovlyаемая i malaya energetika – 2016*. vol. 13. — Komitet VIE RosSNIO, Moscow: 2016, 371–379.
31. Andreenko T.I., Degtyarev K.S., Kiseleva S.V., Rafikova Yu.Yu. Geography of Russian bioenergy resources. (in Russ.). *Journal of Environmental Earth and Energy Study*. 2025, 3, 4-23.
32. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A. Territorial design of renewable power industry in Russia. (in Russ.). *Journal of Environmental Earth and Energy Study*. 2024, 1, 36-50.
33. McKuin, B., Zumkehr, A., Ta, J. *et al.* Energy and water co-benefits from covering canals with solar panels. *Nat Sustain* **4**, 609–617 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00693-8>
34. Soloviev A.A., Chekarev K.V. Natural draught evaporation cooling tower with external heat exchange. *Inventions. Useful models. The official Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property (ROSPATENT)*. 2014, 25, 1–7.

35. Benamer A., Vissarionov V.I. A solar water-lifting installation (SVU) for the water supply of autonomous consumers. (in Russ.). *Tekhnika i tekhnologii*. 2007; (1): 32–35. <https://www.elibrary.ru/judgsx>
36. Yuferev L.Yu. Improving the efficiency of the solar water-lifting installation for irrigation in conditions of variable clouds. (in Russ.). *Agrarian sciences*. 2023, 7, 134-137
37. Koschikowsky J., Wiegghaus M., Rommel M. Solar-powered membrane desalination plants based on membrane distillation. *Desalination* 156 (2003), 295-304.
38. Lotfy, H.R., Staš, J. & Roubik, H. Renewable energy powered membrane desalination — review of recent development. *Environ Sci Pollut Res* 29, 46552–46568 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20480-y>
39. Selvi S. R., Baskaran R. Solar Photovoltaic-powered Membrane Distillation as Sustainable Clean Energy Technology in Desalination. October 2015. *Current Science* 109(7):1247. DOI: 10.18520/v109/i7/1247-1254
40. Elfaqih, A.K., Elbaz, A. & Akash, Y.M. A review of solar photovoltaic-powered water desalination technologies. *Sustain. Water Resour. Manag.* 10, 123 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01067-6>
41. Gao, Jintong et al. Extreme salt-resisting multistage solar distillation with thermohaline convection *Joule*, Volume 7, Issue 10, 2274 – 2290. October 18, 2023
42. Metlov G.N., Korolev V.A., Belenov A.T. Mobile solar photovoltaic water lifting installations for irrigation. (in Russ.). *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2016, 33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/peredvizhnye-solnechnye-fotoelektricheskie-vodopodemnye-ustanovki-dlya-orosheniya>
43. Schedrin V.N., Baklanova D.V., Bondarenko V.L., Lobanov G.L. Assessment of prospects for the use of small hydropower in irrigation systems to meet intra-system electricity needs. (in Russ.). *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2017, 3 (27), 160-178.
44. Estimation of wind energy resources in regions of Russia for green hydrogen production and reduction of CO₂ emission / L. V. Nefedova, K. S. Degtyarev, S. V. Kiseleva, M. Y. Berezkin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2022. — Vol. 988, no. 3. — P. 032023
45. Prospects for green hydrogen production in the regions of Russia / L. Nefedova, K. Degtyarev, S. Kiseleva, M. Berezkin // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 265, no. APEEM 2021. — P. 04011.

Review of water supply problems in the arid regions of Southern Russia and the possible role of renewable energy in their solution

^{1,2}Kirill Degtyarev, ^{1,3}Ludmila Nefedova, ^{1,4}Mikhail Berezkin

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ²kir1111@rambler.ru, ³nefludmila@mail.ru,
⁴mberezkin@inbox.ru

Abstract. The work examines the current problems of water supply in the arid regions of Southern Russia, including in the context of climate change, the demographic and socio-economic situation in the regions, existing and proposed approaches to their solution, their advantages and disadvantages. The study shows that two groups of water sources can be distinguished for arid territories with insufficient surface water resources - external and internal. External sources include the construction of canals and pipelines supplying water from more watered areas, while internal sources include a wide range, including the use of local groundwater, accumulation of rain and snow water in cold and wet seasons, desalination of seawater (in coastal areas), and extraction of water from atmospheric air. As a rule, none of these sources can solve the problem of providing the territory with sufficient water and, at the same time, without significant investment and external costs, and therefore combined options are the most acceptable. The authors of the article explore the possibilities of using renewable energy sources in water supply, and review currently available solutions related to water extraction and transportation, including solar, wind, and hydropower.

Keywords: South of Russia, water, water resources, canals, aqueducts, surface waters, groundwater, atmospheric waters, renewable energy sources, hydropower, wind energy, solar energy.

УДК 621.472 + 621.3 + 681.7.066.2

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-92-99

EDN: MYYPCT

Разработка трекера для системы двигателя Стирлинга с оптической фокусировкой на базе Arduino

^{1,1} Ковалёва Екатерина Дмитриевна [0000-0002-9616-2965],^{1,2} Берёзкин Виктор Юрьевич [0000-0002-1025-638X]

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
Москва, Россия

E-mail: ¹ 1132249338@pfur.ru, ² berezkin-vyu@pfur.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка автоматического трекера для системы двигателя Стирлинга с оптической фокусировкой на базе микроконтроллера Arduino. Основные компоненты включают микроконтроллер Arduino, фоторезисторы, сервоприводы, линза Френеля как оптическая установка и вспомогательные материалы. Алгоритм управления обеспечивает автоматическое слежение за солнцем. Работа подчёркивает простоту сборки и эксплуатации, способствуя устойчивому энергоснабжению.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, солнечная энергия, оптическая фокусировка, линза Френеля микроконтроллер Arduino.

1 Введение

В условиях растущего глобального спроса на альтернативные источники энергии разработка Двигателя Стирлинга, работающего за счет солнечной энергии становится перспективным направлением [1]. Двигатель Стирлинга это машина принцип действия которой основан на термодинамическом цикле [1,2]. Она преобразует тепловую энергию в механическую за счёт расширения и сжатия газа при разных температурах, преимущество заключается в использовании внешнего источника тепла [2]. Однако эффективность данного устройства напрямую зависит от точного фокусирования солнечных лучей на рабочем поршне [3]. Данный результат можно достичь с помощью оптической фокусировки. Для повышения эффективности такой системы необходимо точное слежение за солнцем, что достигается путем использования автоматических трекеров.

В данной работе рассматривается разработка прототипа трекера на базе Arduino, интегрированного с оптической системой и двигателем Стирлинга. Важность автоматизации самого процесса заключается в том, что ручное позиционирование неэффективно и требует постоянного контроля, в то время как автоматические трекеры обеспечивают непрерывное слежение, адаптируясь к движению солнца.

Цель заключается в разработке и создании работающей модели трекера с двигателем Стирлинга и оптического устройства на базе Arduino.

2 Результаты и их обсуждение

Стандартные солнечные панели имеют ограничения по КПД около 15–20%, в то время как двигатель Стирлинга может достигать около 40-60% и выше [1,4].

Данная разрабатываемая технология повышает коэффициент полезного действия (КПД) данной системы. Линза Френеля, направляемая трекером, фокусирует солнечные лучи на горячем цилиндре двигателя, что увеличивает его эффективность. Это достигается за счёт минимизации потерь тепла и поддержания высокой температуры в рабочей зоне [3]. Arduino с подключёнными фоторезисторами обеспечивает непрерывное отслеживание позиции солнца в реальном времени, без необходимости ручного вмешательства. Система адаптируется к изменениям угла наклона и направления.

3 Компоненты системы

Созданная нами, действующая модель трекера включает в себя следующие части, см. рис.1 и рис.2:

1. Микроконтроллер Arduino - центральный процессор (1 шт).
2. Датчики положения: фоторезисторы - определяют положение Солнца через сравнение уровня освещённости в разных направлениях (4 шт).
3. Сервомоторы (сервоприводы): горизонтальный сервопривод (1 шт.) и вертикальный сервопривод (1 шт.).
4. Оптический элемент фокусировки и теплоприёмник: Линза Френеля (1 шт) и двигатель Стирлинга (1 шт).
5. Сопутствующие материалы: резисторы на 1кОм (4 шт); соединительные провода разных типов; фанера как материал для каркаса и основы системы; макетная плата; винты и гайки для фиксации; свинцовый блок на 1 кг для равновесия
6. Источник питания: батарея на 5В; ноутбук

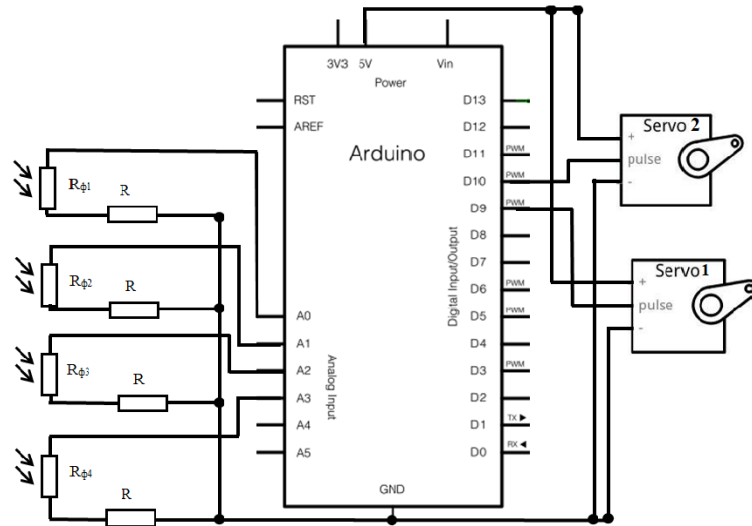
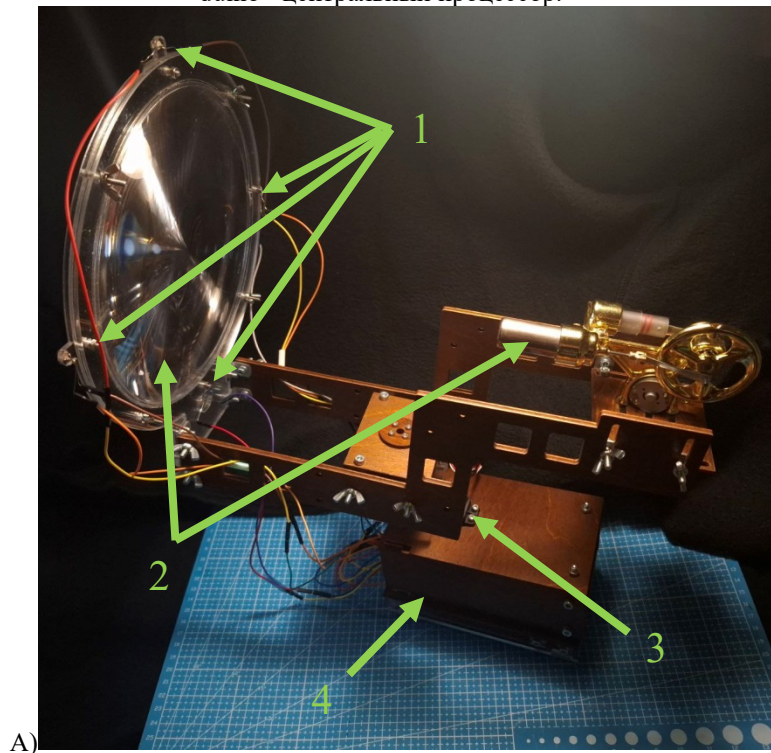
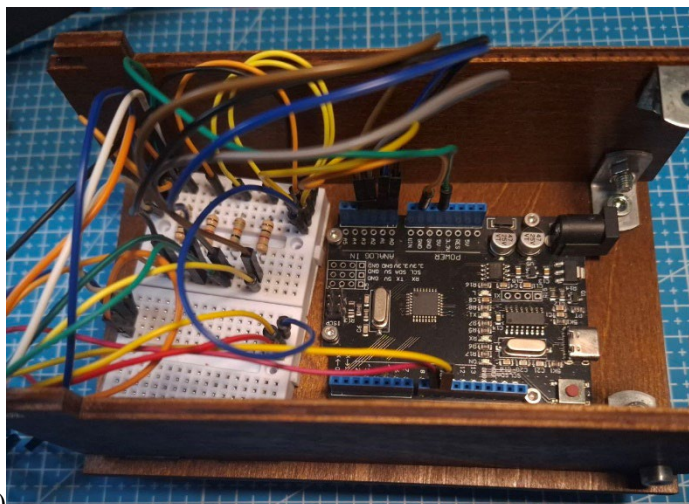


Рис. 1. Схема подключения устройства.

$R_{\phi n}$ – фоторезисторы; R – резисторы на 1кОм; Servo 1,2 – сервомоторчики; Arduino – центральный процессор.





Б)

Рис. 2. А) Модель в собранном виде: 1) Расположения пар фоторезисторов; 2) Линза Френеля и теплоприёмник (двигатель Стирлинга); 3) Расположение сервоприводов (горизонтального и вертикального); 4) Основание с аппаратурой. Б) Платы управлением трекера.

4 Алгоритм управления

Принцип работы трекера заключается в автоматическом определении положения солнца, синхронизации с его движением, непрерывной корректировке угла наклона линзового оптического устройства и оптимизации угла падения солнечных лучей на приемник излучения.

Работа осуществляется в несколько этапов:

На первом этапе определение пространственного положения Солнца в системе осуществляется посредством четырёх фоторезисторов, организованных в две измерительные пары. Первая пара (левый и правый фоторезисторы) отвечает за контроль горизонтального положения, вторая (верхний и нижний) — за вертикальное положение. Каждая пара фоторезисторов осуществляет синхронное измерение интенсивности падающего светового потока. Физической основой измерений служит зависимость электрического сопротивления фоторезистора от освещённости: с ростом интенсивности излучения сопротивление уменьшается.

На втором этапе микроконтроллер посредством схемы делителя напряжения производит измерение падения напряжения на каждом фоторезисторе. Полученные аналоговые значения преобразуются в цифровой формат. Далее микроконтроллер вычисляет разность показаний между противоположными датчиками в каждой паре. На основе анализа этих разностей определяется направление и величина корректировки положения устройства по двум осям.

На третьем этапе управляющие сигналы передаются на сервоприводы, которые поворачивают систему до достижения минимальной разницы в показаниях

между противоположными датчиками. При достижении минимальной разности показаний между противоположными фоторезисторами положение фиксируется.

В результате система стабилизируется в положении, при котором угол падения лучей близок к 90° . Это оптимальная ориентация для линзы Френеля и двигателя Стирлинга, обеспечивающая эффективность сбора энергии.

Схема данного алгоритма представлена на рис. 3.

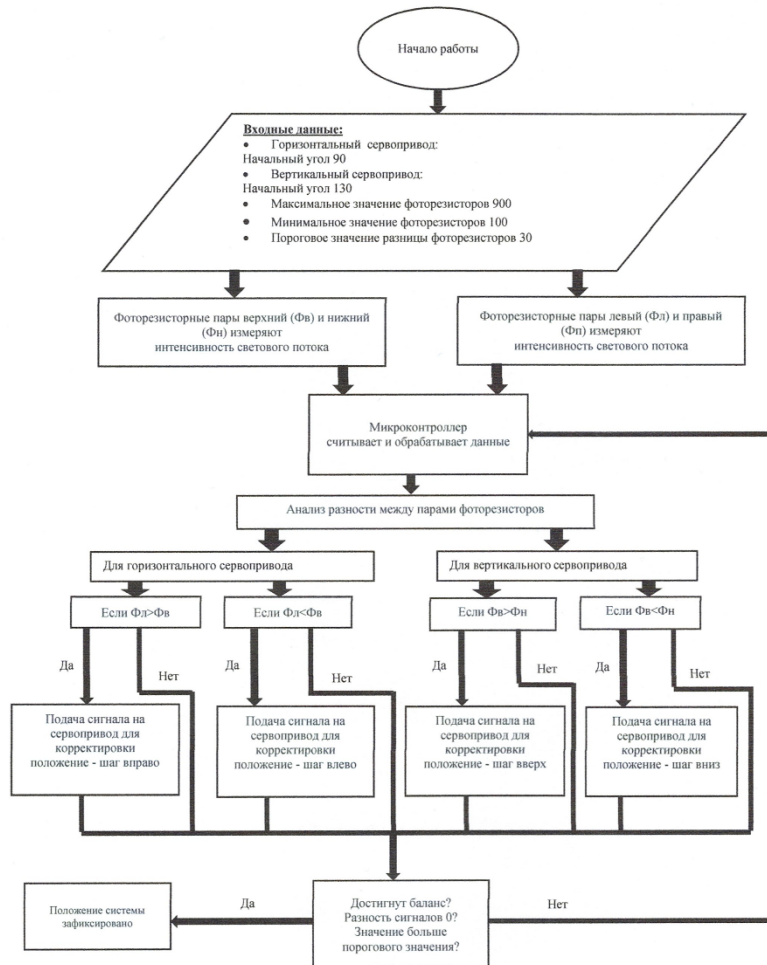


Рис. 3. Схема алгоритма.

Данный алгоритм выполняется по средствам программирования микроконтроллера Arduino на языке C++[5].

5 Исследование параметров и эксплуатационных характеристик трекера

Конструкция системы предусматривает ограничение угла поворота сервоприводов по обеим осям. Рабочий диапазон горизонтальной оси составляет от 10° до 130° . Рабочий диапазон вертикальной оси составляет от 30° до 130° .

Ограничения предотвращают попытку привода повернуться на физически невозможный или нерасчётный угол, также фокусировка работы в строго обозначенной зоне позволяет точно калибровать датчики и анализировать поведение системы.

Частота обновления позиционирования определяется временем выполнения цикла программы и динамическими характеристиками сервоприводов. В текущей реализации цикл ограничен искусственной задержкой 100 мс (миллисекунд). Заданная временная задержка, введённая для стабилизации работы и исключения колебания «дёргания» сервоприводов.

Точность позиционирования определяется двумя параметрами: шагом коррекции и размером "мертвой зоны", создаваемой порогом. В данном коде шаг равен 2° , а порог равен 30° .

Установка порогового значения служит для исключения реакции системы на незначительные отклонения. Коррекция положения активируется исключительно при превышении разности показаний датчиков установленного порога в 30 условных единиц. Это создаёт зону нечувствительности «мёртвую зону», в пределах которой система сохраняет текущую позицию, считая её допустимой, что предотвращает избыточные срабатывания и обеспечивает стабильность работы.

Для корректировки положения устанавливается шаг в 2 градуса. Система не сможет стабилизироваться с ошибкой меньше, чем этот шаг, так как просто не станет делать более мелких движений.

Повышение точности позиционирования системы может быть достигнуто за счёт уменьшения временной задержки, порога чувствительности и величины шага коррекции. Однако снижение данных параметров до критических значений способно привести к возникновению автоколебаний вблизи границы зоны нечувствительности. В таком режиме система периодически активирует корректирующие воздействия, не достигая устойчивого состояния, что визуально проявляется в виде высокочастотных колебаний исполнительного механизма «дёргание». Данное явление сопровождается снижением энергетической эффективности, повышением механической нагрузки на элементы привода и уменьшением общего ресурса работы системы. В избежание такого исхода необходимо улучшение аппаратной составляющей.

6 Вывод

Проведенные исследования и практические испытания подтвердили, что разработанная система автоматического трекинга для двигателя Стирлинга с оптической фокусировкой успешно справляется с поставленными задачами.

Эффективность алгоритма, на данных настройках, системы демонстрирует стабильное отслеживание Солнца с оптимальным попаданием солнечных лучей, без ложных срабатываний, что показывает стабильность работы.

Преимуществом проекта является также базовая конструкция из доступных материалов, имеющая низкую себестоимость и технически осуществимая для тестирования в различных условиях.

Конструктивная гибкость решения позволяет осуществлять его модернизацию путём внедрения более современных сенсорных и исполнительных элементов, а также благодаря модульной архитектуре программного обеспечения и простой адаптации его алгоритмов, что открывает перспективы для дальнейшего совершенствования эксплуатационных характеристик.

Использование такой технологии как трекер с оптической установкой на базе Arduino позволит повысить практическую ценность двигателей Стирлинга в сфере возобновляемой энергетики.

Литература

1. Что такое КПД двигателя [Электронный ресурс] // E-Motors Corp. — URL: <https://inlnk.ru/PmjJKE> (дата обращения: 25.10.2025).
2. Докторов Е. В. Применение двигателя Стирлинга для выработки электроэнергии / А. В. Николаев, А. А. Рожин, Д. В. Юдин // Международный технико-экономический журнал. — 2023. — С. 737-739.
3. Александров В.В. Моделирование выработки мощности концентраторного солнечного модуля с КПД свыше 30% на основе линзы френеля и многопереходного солнечного элемента АЗВ5 / А.В. Андреева // Журнал наука настоящего и будущего. — 2023. — № 1. — С. 20–24.
4. От чего зависит КПД солнечных батарей [Электронный ресурс] // MyWatt. — URL: <https://mywatt.ru/poleznaya-informaciya/ot-chego-zavisit-kpd-solnechnyh-batarej> (дата обращения: 20.10.2025).
5. Arduino [Электронный ресурс] // Официальный сайт Arduino. — URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения: 16.10.2025).

References

1. What is engine efficiency [Electronic resource] // E-Motors Corp. — URL: <https://inlnk.ru/PmjJKE> (date of request: 10/25/2025).
2. Doktorov E. V. Application of the Stirling engine for power generation / A.V. Nikolaev, A. A. Rozhin, D. V. Yudin // International Technical and Economic Journal, 2023, pp. 737-739.

3. Alexandrov V.V. Modeling the power generation of a concentrator solar module with an efficiency of over 30% based on a Fresnel lens and a multi-junction solar cell A3B5 / A.V. Andreeva // Journal Science of the present and the Future. — 2023. — No. 1. — pp. 20-24.
4. What determines the efficiency of solar panels [Electronic resource] // MyWatt. — URL: <https://mywatt.ru/poleznaya-informaciya/ot-chego-zavisit-kpd-solnechnyh-batarej> (date of reference: 10/20/2025).
5. Arduino [Electronic resource] // Official Arduino website. — URL: <https://www.arduino.cc/> (date of access: 10/16/2025).

Development of a tracker for an Arduino-based Stirling optical focusing engine system

^{1,1} Ekaterina. Kovaleva, ^{1,2} Victor Berezkin

¹ Peoples' Friendship University of Russia Patrice Lumumba, Moscow, Russia

E-mail: ¹1132249338@pfur.ru, ²berezkin-vyu@pfur.ru

Abstract. The paper considers the development of an automatic tracker for a Stirling engine system with optical focusing based on an Arduino microcontroller. The main components include an Arduino microcontroller, photoresistors, servos, a Fresnel lens as an optical installation, and auxiliary materials. The control algorithm provides automatic tracking of the sun. The work emphasizes ease of assembly and operation, contributing to a sustainable energy supply.

Keywords: Stirling engine, solar energy, optical focusing, Fresnel lens, Arduino microcontroller

УДК 504.054

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-100-110

EDN: RUPHAI

Критерии и показатели оценки экологического риска АЭС

¹Крышев Иван Иванович [0000-0002-2053-4937],²Сазыкина Татьяна Григорьевна [0000-0002-9082-5190]

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск,
Россия

E-mail: ¹kryshev@rpatyphoon.ru, ²sazykina@rpatyphoon.ru

Аннотация. Целью работы является выбор критериев и показателей оценки экологического риска в условиях многофакторного воздействия АЭС на окружающую среду. Рассмотрены требования к оценке экологического риска. Определены критерии и показатели для оценки экологического риска в районах расположения АЭС. Разработан показатель интегральной антропогенной нагрузки (ПИАН) для описания совместного действия на биоту ионизирующей радиации и нерадикационных факторов (тепловой сброс, химического загрязнения, механического воздействия). Выполнена апробация предложенного показателя по данным радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Ленинградской АЭС. По результатам апробации показано, что сравнительно небольшие величины различных типов техногенного воздействия, суммируясь в результате нелинейных эффектов, могут давать заметную интегральную величину по сравнению с фоном.

Ключевые слова: экологический риск, АЭС, ионизирующая радиация, тепловой сброс, химическое загрязнение, механическое воздействие, показатель интегральной антропогенной нагрузки, радиоэкологический мониторинг, водоем-охладитель

1 Введение

Энергетическая политика на современном этапе определяется рядом факторов: потребностями в энергии, энергетическими ресурсами, воздействием используемых источников энергии на биосферу. Вопросы обеспечения экологической безопасности наряду с экономическими и ресурсными ограничениями при-

обретают решающее значение при оценке перспектив развития различных источников энергии. Развитие ядерной энергетики требует создания высокоэффективной системы обеспечения экологической безопасности на всех этапах функционирования АЭС. При этом, наряду с возможностью радиоактивного загрязнения окружающей среды, необходимо учитывать весь комплекс техногенных факторов характерных для районов АЭС: дополнительное термальное воздействие, химическое загрязнение, механические повреждения организмов на гидротехнических устройствах станции и др. Важным инструментом анализа безопасности при использовании ядерной энергии является оценка экологического риска. Целью работы является выбор критериев и показателей оценки экологического риска в условиях многофакторного воздействия АЭС на окружающую среду.

2 Критерии и показатели оценки воздействия на экосистемы ионизирующей радиации и нерадиационных факторов

В реальных условиях воздействие ионизирующей радиации на природные объекты осуществляется комбинированно с нерадиационными факторами. Характерным примером является экосистема водоема-охладителя АЭС, подверженная влиянию теплового сброса, химического загрязнения, эвтрофирования, механического травмирования организмов в водозаборных устройствах АЭС, а также дополнительного облучения от искусственных радионуклидов [1-3].

Важным условием эффективного анализа экологических рисков является выбор адекватных рассматриваемым задачам критериев оценки риска. В общем случае к критериям оценки экологического риска предъявляют следующие требования: возможность однозначного определения, согласованность с пространственными масштабами и особенностями временной динамики исследуемых процессов, измеримость, низкая природная вариабельность, существование экспериментальной базы данных, диагностичность, пригодность для прогноза, чувствительность к оценке риска, экологическая и социальная значимость [4, 5].

Таблица 1. Показатели оценки экологического риска для факторов воздействия АЭС (штатные условия эксплуатации)

Показатель (метод его оценки)	ТС	ХЗ	МВ	ИР
Динамика численности видов (Статистический анализ временных рядов наблюдений)	X	X	X	
Стабильность онтогенеза (Оценка флуктуирующей асимметрии билатеральных структур)	X	X		X
Число и распределение видов по численности (Индексы видового разнообразия)	X	X	X	

Показатель (метод его оценки)	ТС	ХЗ	МВ	ИР
Устойчивость взаимосвязей между элементами экосистемы (Корреляционный анализ временных рядов наблюдений)	X	X	X	
Устойчивость процессов сукцессии (Спектральный анализ временных рядов наблюдений)	X	X	X	
Эколого-физиологические параметры экосистемы: первичная продукция, рост, рождаемость, смертность (Экспериментальное определение и математическое моделирование)	X	X	X	X

Примечание. Знаком X отмечена потенциальная чувствительность к факторам техногенного воздействия. ТС-тепловой сброс, ХЗ-химическое загрязнение, МВ-механическое воздействие, ИР-ионизирующая радиация.

Для практического использования при оценке экологического риска в районах расположения АЭС предложены следующие критерии и показатели (таблица 1) [3-4]:

- статистические характеристики динамики численности видов в наибольшей степени подверженных воздействию техногенных факторов в районе АЭС;
- стабильность онтогенеза, оцениваемая по уровню флуктуирующей асимметрии билатеральных структур организмов (этот показатель может рассматриваться в качестве неспецифического индикатора ранних нарушений развития организмов);
- индексы видового разнообразия сообществ (видовое обилие, индекс доминирования Симпсона, индекс Шеннона и различные его модификации);
- индексы сходства взаимных функциональных корреляций между компонентами экосистемы в различные сезоны и годы наблюдений;
- устойчивость процессов сукцессии видов в экосистеме, оцениваемая при помощи методов спектрального анализа временных рядов наблюдений;
- эколого-физиологические параметры, определяемые экспериментально и при помощи методов математического моделирования экосистем.

Перечисленные показатели характеризуют различные структурные и функциональные изменения в экосистемах в условиях воздействия комплекса радиационного и нерадиационных техногенных факторов.

3 Показатель интегральной антропогенной нагрузки

Для оценки суммарного воздействия техногенных факторов на экосистемы предложен показатель интегральной антропогенной нагрузки (ПИАН), который учитывает в явном виде усиление токсического действия и интенсификацию биохимических процессов при возрастании температуры, описывает действие суммы факторов стресса с учетом возможного синергического действия комбинаций загрязнителей, основывается на нормировке относительно базового (фоновое) режима экосистемы [2-3].

Расчет показателя интегральной антропогенной нагрузки I_a производится по формуле:

$$I_a = \sum_{i=1}^m n_i F_i(t_a^o) f_{ai} / f_{bi} + \sum_{i \neq j} W_{ij}^c(f_{ai}, f_{aj}, t^o), \quad (1)$$

где n_i - нормировочный коэффициент относительной значимости антропогенного фактора i , при отсутствии информации об относительной значимости факторов антропогенного воздействия можно приближенно считать $n_i = 1/m$; $F_i(t_a^o)$ - функция зависимости от температуры антропогенного фактора i ; t_a^o - средняя температура в зоне влияния подогретых вод; f_{ai} - значение i -го фактора антропогенного воздействия; f_{bi} - фоновое значение i -го фактора антропогенного воздействия; $W_{ij}^c(f_{ai}, f_{aj}, t^o)$ - функция синергического действия антропогенных факторов.

Функция зависимости от температуры в диапазоне термотолерантности может быть взята в виде [2-3]

$$F_i(t_a^o) = K_i \exp [\alpha(t_a^o - t_b^o)], \quad (2)$$

где K_i , α - постоянные параметры, $K_i = 1$, $\alpha = 0,065 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Пример оценки ПИАН по данным радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Ленинградской АЭС представлен в таблице 2.

Таблица 2. Параметры воздействия ионизирующей радиации и антропогенных нерадикационных факторов на экосистему водоема-охладителя АЭС

Параметр	Величина	Вклад в ПИАН, % (подогрев поверхностных вод на 10 °C)
Ионизирующая радиация. Отношение среднегодовой мощности дозы облучения представительных организмов в зоне воздействия сбросов радионуклидов к фоновому уровню.	0,1	< 1%
Биогенная нагрузка. Отношение среднегодовой концентрации фосфатов в зоне воздействия сбросов к концентрации на фоновом участке (биогенная нагрузка).	3,0	20

Параметр	Величина	Вклад в ПИАН, % (подогрев поверхностных вод на 10 °С)
Химическое загрязнение. Сумма отношений среднегодовых концентраций нефтепродуктов, ПАВ, тяжелых металлов (железо, кобальт, медь, хром) в зоне воздействия сбросов к показателям регионального фона.	2,0	13
Механическое повреждение в охладительной системе АЭС. Увеличение смертности организмов зоопланктона и молоди рыб в охладительной системе АЭС.	6,0	40
Эффект синергизма. Возрастание смертности водных организмов в результате совместного действия механического стресса и химических токсикантов по отношению к аддитивному эффекту	1,5	26
ПИАН при подогреве 10 °С		7,2
ПИАН, фоновое значение		1,0

Использование такого показателя для водоема-охладителя Ленинградской АЭС показывает, что сравнительно небольшие величины различных типов техногенного воздействия, суммируясь в результате нелинейных эффектов, могут давать заметную интегральную величину по сравнению с фоном [1-3]. В приведенном примере наибольший вклад в суммарную нагрузку дает фактор механического травмирования организмов на водозаборных устройствах АЭС, при устранении которого величина ПИАН уменьшается в 3 раза. Наименее значимый фактор – дополнительное облучение водных организмов искусственными радионуклидами (таблица 2).

Следует отметить, что ПИАН может существенно возрастать при повышении температуры выше температурного оптимума (для водоемов умеренных широт выше 30 °С). Для наземных экосистем в зоне наблюдений АЭС в условиях штатной эксплуатации величина ПИАН не отличается значимо от фоновых значений. Для практического применения показателя интегральной антропогенной нагрузки необходимо выполнить ранжирование его величины для различных регионов размещения АЭС на основе оценок экологических эффектов в экосистемах при разных уровнях суммарного антропогенного воздействия.

Рассмотрим некоторые аспекты этой проблемы на примере обобщенных результатов многолетних исследований динамики экосистемы водоема-охладителя Ленинградской АЭС [1-3, 6-11].

В естественном состоянии Копорская губа, на побережье которой была построена Ленинградская АЭС, характеризовалась как чистый олиготрофный водоем. Экологическое равновесие в водоеме в период до пуска АЭС поддерживалось за счет естественных энергетических потоков, таких как солнечная энергия, поступление биогенных элементов со стоком рек и в результате водообмена с основной акваторией Финского залива, ветровое перемешивание и др.

Создание АЭС привело к возникновению дополнительных потоков энергии в экосистему, таких как тепло сбросных вод и перемещение водных масс, забираемых сначала в систему охлаждения, а затем сбрасываемых в залив в количестве до 200 м³/с (при подогреве на 8-10 °С. В период эксплуатации четырех энергоблоков с реакторами РБМК-1000 объем воды, забираемой ежегодно для охлаждения конденсаторов турбин АЭС (6,3 км³/год), значительно превышал объем Копорской губы. Важным фактором воздействия на биотические сообщества водоема-охлаждителя стало травмирование гидробионтов на водозаборных устройствах и при прохождении охлаждающей системы электростанции. Создание АЭС и развитие города Сосновый Бор оказали воздействие на качество природных вод вследствие избыточного по сравнению с естественным уровнем поступления биогенных элементов (эвтрофирования водоема), а также его загрязнения химическими токсикантами. Воздействие низкопотенциального сбросного тепла АЭС в совокупности с другими техногенными факторами привело к возникновению многолетней антропогенной сукцессии, выразившейся в следующем.

Массовое развитие в зоне подогрева получили сине-зеленые водоросли, динамика которых характеризуется увеличением частоты и интенсивности вспышек цветения (рис. 1) [1, 3, 7, 8].

Отношение средней за сезон численности сине-зеленых к численности диатомовых водорослей увеличилось практически на порядок по сравнению с фоновыми значениями. Заметно расширились сроки вегетации водорослей, с 5-7 месяцев в начальный период исследований, до практически круглогодичной вегетации в зоне подогрева, без зимнего перерыва.

Видовой состав всех основных систематических групп фитопланктона изменился более чем на 50%. Изменились процессы сезонной сукцессии в доминирующих группах фитопланктона - сине-зеленых и диатомовых водорослях. Начались неравновесные процессы замещения видов внутри группы сине-зеленых водорослей. В целом можно сделать вывод, что поступление в прибрежные воды дополнительного количества биогенных элементов в сочетании со сбросом теплых вод от АЭС обусловили массовое развитие и структурную перестройку сообщества фитопланктона [1, 3, 7, 8].

Произошло снижение видового разнообразия и изменение хода сезонной сукцессии в сообществе зоопланктона [1, 8, 9]. Усилилось доминирование небольшого числа видов зоопланктона, практически полностью определяющих его численность в отдельные интервалы времени.

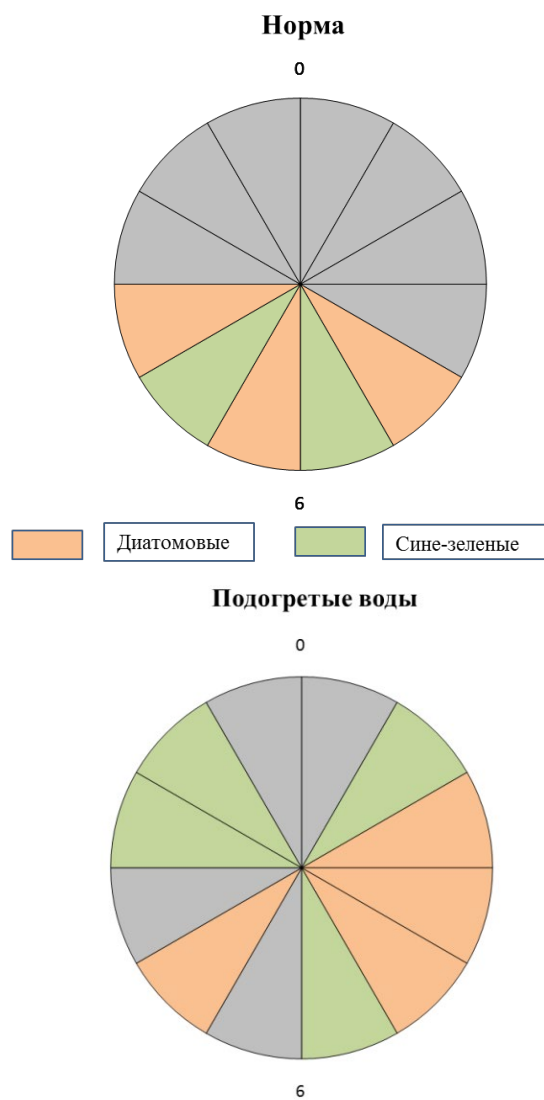


Рис. 1. Диаграммы сезонной сукцессии доминирующих групп фитопланктона в водоеме-охладителе Ленинградской АЭС по месяцам года (естественные температуры и в зоне подогрева вод)

Начавшаяся трансформация экосистемы охватила и самые верхние трофические уровни, а именно, сообщество рыб, что отразилось на изменении видовой структуры ихтиофауны, а также на процессах размножения и развития рыб [1, 8, 9, 10]. Отмечено воздействие АЭС на условия воспроизводства рыб. Произошло

уменьшение видового разнообразия, упрощение структуры ихтиоценоза. Показано увеличение дисперсии флуктуирующей асимметрии рыб в районе сброса теплых вод АЭС (таблица 3), свидетельствующее о нарушении стабильности их развития в ранние периоды онтогенеза [11] в условиях сочетанного действия ионизирующей радиации и комплекса нерадиационных факторов, характерных для водоема-охладителя АЭС.

Таблица 3. Мощность дозы внутреннего облучения рыб искусственными радионуклидами и дисперсия флуктуирующей асимметрии числа мягких лучей в грудных плавниках на разных сторонах тела рыб в районе Ленинградской АЭС [11]

Вид	Мощность дозы, нГр/сут			Дисперсия флуктуирующей асимметрии		
	Сбросной канал АЭС	Копорская губа	Реки	Сбросной канал АЭС	Копорская губа	Реки
Плотва	130	120	34	0,50	0,48	0,22
Окунь	65	47	23	0,43	0,17	0,07
Гольян	35		23	0,22		0,20
Уклейка	27			0,27		
Карась	80			0,53		
Салака		29			0,22	
Лещ	70	21		0,68	0,20	
Голец			12			0,10

В целом, результаты экологического мониторинга свидетельствуют о возникновении неравновесного режима в динамике прибрежной экосистемы водоема-охладителя АЭС. Следует отметить, что трансформация экологических процессов проявилась не сразу, а через 4-5 лет после начала работы АЭС, особенно после выхода АЭС на полную проектную мощность. В этой связи экологический мониторинг в районах АЭС должен осуществляться в течение достаточно длительного интервала времени, чтобы достоверно оценить воздействие АЭС на экологическое равновесие.

Опыт исследований экосистем в районах АЭС показывает необходимость разработки региональных экологических нормативов для ограничения воздействия, как самой станции, так и соседних промышленных и сельскохозяйственных объектов. Разработка методологии экологического нормирования в районах АЭС представляет собой важную в научном и практическом плане проблему.

4 Выводы

Определены критерии и показатели для оценки экологического риска в районах расположения АЭС, характеризующие различные структурные и функциональные изменения в экосистемах в условиях воздействия комплекса радиационного и нерадиационных техногенных факторов.

Для оценки суммарного воздействия техногенных факторов на экосистемы предложен показатель интегральной антропогенной нагрузки, учитывающий суммарное действие ионизирующей радиации и нерадиационных факторов стресса.

По результатам апробации ПИАИ по данным радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Ленинградской АЭС показано, что сравнительно небольшие величины различных типов техногенного воздействия, суммируясь в результате нелинейных эффектов, могут давать заметную интегральную величину по сравнению с фоном. Для наземных экосистем в зоне наблюдений АЭС величина ПИАИ не отличается значимо от фоновых значений.

Литература

1. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. Второе издание, переработанное и дополненное. М.: ИздАТ. 2010. 497 с.
2. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990. 184 с.
3. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: ООО «Маска», 2022. 638 с.
4. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Критерии оценки экологического риска // Эколого-геофизические аспекты ядерных аварий. М.: Гидрометеиздат, 1992. С.160-168.
5. Suter II G.W. Endpoints for regional risk assessments // Environmental Management. 1990. Vol.14, N 1. P.9-23.
6. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Павлова Н.Н., Косых И.В., Буякова А.А., Крышев А.И. Оценка радиационной безопасности морской среды в районе расположения Ленинградской АЭС по данным многолетнего мониторинга (1973-2019). Морской биологический журнал, 2021, том 6, № 1, с. 1–17.
7. Балашова Н.Б., Никитина В.Н., Зимина Л.М., Сазыкина Т.Г. Многолетние изменения фитопланктона морского водоема-охладителя Ленинградской АЭС // Экология. 1992. N 1. С.10-16.
8. Зимина Л.М., Сазыкина Т.Г., Зимин В.Л., Рябова В.Н. Оценка воздействия теплового загрязнения и биогенных стоков на состояние прибрежных биоценозов водоема-охладителя Ленинградской АЭС // Экология АЭС. Сборник материалов научного семинара (1-10 июня 1991 г., Одесса). – Москва: Ядерное Общество, 1992. С.165-171.
9. Зимин В.Л., Рябова В.Н. Изменение структуры прибрежной ихтиофауны и зоопланктона Копорской губы Финского залива // Труды Института Экспериментальной Метеорологии, 1992. Вып.19 (152). С.77-85.

10. Экологические аспекты исследований водоемов-охладителей АЭС. М.: ИЭМЭЖ АН СССР, 1983. 220 с.
11. Рябов И.Н., Крышев И.И. Оценка уровня флуктуирующей асимметрии и дозы облучения рыб морского водоема-охладителя АЭС //Вопросы ихтиологии. 1990. Т.30, N 3. С.519-522.

References

1. Kryshev I.I., Ryazantsev E.P. Environmental safety of the nuclear energy complex of Russia. Second edition, revised and expanded. Moscow: IzdAT, 2010. 495 p. (In Russ.).
2. Kryshev I.I., Sazykina T.G. Simulation models for the ecosystem dynamics under anthropogenic impact from thermal and nuclear power plants. M.: Energoatomizdat, 1990.184 p. (In Russ.).
3. Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kryshev I. I. Modelling of radioecological processes in the environment. Moscow: Maska, 2022. 638 p. (In Russ.).
4. Kryshev I. I., Sazykina T. G. Criteria for evaluating ecological risk. In: Ecological and geophysical aspects of nuclear accidents. M.: Hydrometeoizdat, 1992, 160-168. (In Russ.).
5. Suter II G.W. Endpoints for regional risk assessments // Environmental Management. 1990. Vol.14, N 1. P.9-23.
6. Kryshev I. I. , Sazykina T. G. , Pavlova N. N. , Kosykh I. V. , Buryakova A. A. , Kryshev A. I. Assessment of radiation state of marine environment in the Leningrad NPP area according to long-term monitoring data (1973–2019). Marine Biological Journal, 2021, vol. 6, no. 1, 41-57. (In Russ.).
7. Balashova N.B., Nikitina V.N., Zimina L.M., Sazykina T.G. Long-term changes in phytoplankton of the marine cooling waters of the Leningrad NPP. Ekologia, 1992, N 1,10-16. (In Russ.).
8. Zimina L.M., Sazykina T.G., Zimin V.L., Ryabova V.N. Assessing the impact of heating and biogenic releases on the state of near-coastal biocenoses of the cooling waters of the Leningrad nuclear power plant. In: Ecology of the NPPs. Proc. Scientific seminar (1-10 June 1991, Odessa). M.: Nuclear Society, 1992, 165-171. (In Russ.).
9. Zimin V.L., Ryabova V.N. Structural changes of inshore ichthyofauna and zooplankton in the Kopora Bay of the Gulf of Finland . Proceedings of the Inst. of Experimental meteorology, 1992. 19 (152), 77-85. (In Russ.).
10. Ecological aspects in the investigations of cooling reservoirs of nuclear power plants. M.: IEMEZ Acad.Sc. USSR, 1983, 220 c. (in Russ.).
11. Ryabov I.N., Kryshev I.I. Estimation of the fluctuating asymmetry and exposure doses for fish inhabiting marine cooling reservoir of the nuclear power plant. Ichthyology Issues, 1990, 30, N 3, 519-522. (In Russ.).

Criteria and indexes for assessing environmental risk from nuclear power plants

¹Ivan Kryshev, ²Tatiana Sazykina

Research and Production Association “TYPHOON”, Obninsk, RUSSIA

E-mail: ¹kryshev@rpatyphoon.ru, ²sazykina@rpatyphoon.ru

Abstract. The paper describes the selection of criteria and indexes for environmental risk assessment in case of the multifactorial impact of nuclear power plants on the environment. General requirements for ecological risk assessment were discussed. Criteria and indexes for estimating ecological risk were formulated for the nuclear power plant regions. Index of the integral anthropogenic impact on biota was developed for evaluating the combined impact of ionizing radiation and non-radiation factors (thermal and chemical releases, mechanical damage). The approbation of the suggested index was performed, using data from radioecological monitoring of the cooling reservoir of the Leningrad nuclear power plant. Based on index estimation, it was demonstrated, that combining small technogenic damages of several types, due to non-linear interaction effects, can lead to significant integral impact above the background.

Keywords: environmental risk, nuclear power plant, ionizing radiation, thermal release, chemical contamination, mechanical damage, index of the integral anthropogenic impact, radioecological monitoring, cooling reservoir

УДК 502.174.3

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-111-122

EDN: VMUSGW

Оценка стоимости водорода при использовании фотоэлектрических и ветроэлектрических установок для условий Дагестана

^{1,1} Марченко Олег Владимирович [0000-0003-4065-3260],^{1,2} Соломин Сергей Владимирович [0000-0002-2674-5196]¹Институт систем энергетики Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, Иркутск, РоссияE-mail: ¹ marchenko@isem.irk.ru, ² solomin@isem.irk.ru

Аннотация. Целью исследования является оценка экономической эффективности производства водорода в России на основе использования возобновляемых энергоресурсов. В качестве примера выбран Дагестан как характерный регион с большим приходом солнечной радиации и приемлемыми ветровыми условиями. На первом этапе определялась стоимость водорода от фотоэлектрических установок (ФЭУ) и ветроэлектрических установок (ВЭУ), работающих отдельно, для различных технико-экономических показателей энергисточников (базового и оптимистического) и климатических условий (средних многолетних значений прихода солнечной радиации и скорости ветра). На втором этапе исследования определялась стоимость водорода при совместной работе ФЭУ и ВЭУ в единой энергосистеме с учётом системных эффектов. Использована оптимизационная математическая модель Renewable Energy Model. Показано, что при благоприятных климатических условиях Дагестана в оптимистическом сценарии технико-экономических параметров ФЭУ и ВЭУ стоимость водорода может составить около 3 \$/кг. В автономной системе электроснабжения за счёт использования "избыточной" электроэнергии от ФЭУ и ВЭУ, которые работают в стохастическом режиме, удаётся снизить стоимость производства водорода примерно до 2 \$/кг.

Ключевые слова: фотоэлектрические установки, ветроэлектрические установки, водород, электролиз, стоимость водорода.

1 Введение

В электроэнергетике Дагестана доминирующую роль играют гидроэлектростанции (более 90% суммарной выработки). Вместе с тем, имеются возможности для внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), использующих солнечные, ветровые, геотермальные и другие (морские волны, приливы в Каспийском море) возобновляемые природные энергоресурсы.

Солнечные и ветровые энергоустановки работают в стохастическом режиме. Это, с одной стороны, требует дублирования их мощности энергоисточниками других типов в периоды недостаточной выработки, с другой – даёт возможность аккумулирования энергии в виде вторичного энергоносителя в периоды ее избытка. Для долгосрочного аккумулирования энергии в энергосистемах с ВИЭ эффективным и экологически чистым энергоносителем является водород – углеродно-нейтральный источник энергии. При последующем использовании водорода в качестве топлива (например, в топливных элементах) не выделяется диоксид углерода, негативно влияющий на климат Земли.

Наиболее экологически чистым считается производство так называемого «зелёного водорода» методом электролиза при использовании электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ [1–3]. В настоящее время благодаря совершенствованию технологий использования возобновляемых энергоресурсов, среди разных типов ВИЭ наиболее быстро увеличиваются мощности ветроэлектрических установок (ВЭУ) и особенно – фотоэлектрических установок (ФЭУ) на основе фотоэлектрического преобразования энергии [4, 5].

Предварительные оценки стоимости водорода, производимого разными способами, приведены в статье [1]. Однако для «зелёного водорода» не рассмотрена зависимость стоимости от климатических условий – инсоляции (прихода солнечной радиации) и скорости ветра.

2 Постановка задачи

Цель настоящей статьи – оценка стоимости водорода, производимого методом электролиза при использовании электроэнергии, вырабатываемой ФЭУ и ВЭУ. Исследуется зависимость стоимости водорода от климатических условий Дагестана, технико-экономических показателей энергоисточников и конфигурации энергосистемы. Аналогичные условия характерны также для ряда других южных районов России, расположенных в Краснодарском крае, Адыгее, Астраханской области, Калмыкии.

3 Объект и метод исследования

Система производства и использования водорода включает источник электроэнергии, электролизёр, компрессор для закачивания водорода в ёмкость для его хранения (ресивер или водородный бак), а также преобразователи тока и напряжения.

Стоимость водорода определялась для нескольких вариантов его производства: с использованием одного из видов ВИЭ (ФЭУ или ВЭУ) и в автономной системе электроснабжения, включающей одновременно и ФЭУ, и ВЭУ. В последнем случае для производства водорода используется "избыточная" электроэнергия, вырабатываемая в моменты времени, когда суммарная мощность ФЭУ и ВЭУ превышает мощность нагрузки. Для дублирования мощности нагрузки в моменты недостаточной выработки ВИЭ используется либо дизельная электростанция, либо (в варианте экологически чистого электроснабжения) – топливные элементы, потребляющие накопленный в ресивере водород. В настоящей работе рассматривалась экологически чистая система электроснабжения, в которой мощность ВИЭ дублировалась топливными элементами на водороде, который выступает в роли долгосрочного аккумулятора энергии. Для сглаживания краткосрочных колебаний выработки ВИЭ применяется (свинцово-кислотный) аккумулятор электроэнергии.

В России автономные системы с производством и энергетическим потреблением водорода могут создаваться как в зонах изолированного электроснабжения, так и в зонах централизованного электроснабжения с целью уменьшения зависимости потребителей от энергетических компаний и производства экологически чистой электроэнергии.

4 Математическая модель

Для расчётов была использована оптимизационная математическая модель, подробно описанная в работах [6, 7]. Модель определяет оптимальную конфигурацию системы электроснабжения и экономические характеристики, включая стоимость (удельные затраты на производство единицы продукции) электроэнергии и водорода. Стоимость продукции равна минимальной цене, при которой ее производство является экономически эффективным (чистый дисконтированный доход проекта неотрицателен). Учитывается переменность режимов потребления электроэнергии, стохастический характер поступления солнечной и ветровой энергии, возможность накопления электроэнергии и водорода для сглаживания неравномерности их выработки.

Модель описывает энергосистему, включающую несколько источников и накопителей энергии. В системе потребляется первичная и производится вторичная и конечная энергия, её работа моделируется с шагом Δt (час) по времени; переменные с индексом $t = 0, 1, 2, \dots, T$ относятся к соответствующим моментам

времени. В момент времени t мощность i -го энергоисточника равна $N_{it} \leq \overline{N}_i$ (где \overline{N}_i – ($i \in I$) установленная мощность, кВт).

В момент времени t запас вторичной энергии в j -ом аккумуляторе ($j \in J_2$) равен $Q_{jt} \leq \overline{Q}_j$ (где \overline{Q}_j – ёмкость аккумулятора, кВт.ч). В рассматриваемом в настоящей работе частном случае вторичный энергоноситель – водород. Кроме того, для всех элементов энергосистемы ($i \in I \cup J_2$) заданы: k_i – удельные (на единицу мощности, для аккумулятора – ёмкости) капиталовложения (долл/кВт или долл/кВт.ч), μ_i – ежегодные постоянные эксплуатационные издержки (доля от капиталовложений) и ΔT_i – срок службы (лет).

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Найти минимум целевой функции

$$Z = \sum_{i \in I} (F_i + \mu_i) k_i \overline{N}_i + \sum_{j \in J_2} (F_j + \mu_j) k_j \overline{Q}_j \rightarrow \min \quad (1)$$

при выполнении ограничений на потребление первичной энергии, производство конечной энергии, балансов вторичной энергии, ограничений на переменные и начальные условия.

Здесь

$$F_i = d / [1 - (1 + d)^{-\Delta T_i}]$$

- коэффициент возврата капитала (1/год), d – годовая норма дисконта.

Искомые переменными являются установленные \overline{N}_i и текущие мощности N_{it} энергоисточников, запасы вторичной энергии в аккумуляторах Q_{jt} и их ёмкости \overline{Q}_j , потоки энергии между элементами энергосистемы.

Умножение единовременных затрат (капиталовложений) на коэффициент возврата капитала преобразует единовременную инвестицию в эквивалентную серию равных ежегодных платежей (аннуитетов), которые могут суммироваться с ежегодными издержками. В связи с этим целевая функция (1) представляет собой суммарные (приведенные к году) дисконтированные затраты на создание и эксплуатацию системы. Затраты суммируются по источникам энергии и аккумуляторам. При заданном объеме отпускаемой потребителям конечной энергии, а также заданных ценах её реализации, минимуму Z соответствует максимум чистого дисконтированного дохода.

Оптимизационная задача решалась с использованием системы моделирования высокого уровня GAMS (General Algebraic Modeling System).

Работа энергосистемы моделировалась с шагом $t=1$ час по времени. Часовые значения скоростей прихода солнечной радиации и скоростей ветра приводятся в онлайн-режиме в Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info>) и Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info>) соответственно.

5 Исходные данные

Дагестан располагает значительными ресурсами геотермальной, гидравлической, солнечной и ветровой энергии [8, 9].

Для России величина среднегодового прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность Q составляет от 800 кВт·ч/м²/год до 1400-1600 кВт·ч/м²/год. Значения многолетних среднегодовых скоростей ветра V изменяются в диапазоне 1-9 м/с [10]. Районы с $V<4$ м/с (очень плохие ветровые условия) могут быть исключены из рассмотрения.

Для Дагестана величина прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность Q является одной из самых высоких в Российской Федерации [11, 12]. Самое большое число часов солнечного сияния зарегистрировано на метеостанциях Ахты и Гуниб [13]. Приход солнечной радиации в г. Махачкала составляет 1600-1680 кВт·ч/м²/год [13–15].

Циркуляция воздуха в пределах Дагестана отличается значительной сложностью. Значения средних многолетних скоростей ветра на высоте измерения 10 м очень редко превышают 5-6 м/с (относительно хорошие ветровые условия). Наиболее подходящей для развития ветровой энергетики является прибрежная зона Каспия. По данным [16] средняя скорость ветра по данным метеонаблюдений более чем за 150 лет максимальна в Махачкале (6 м/с).

На основной части территории Дагестана скорости ветра меньше 3-4 м/с [10, 16]. Такое значение характерно для плохих ветровых условий даже с учётом роста скорости ветра на высоте ветроколеса и, как правило, изначально свидетельствует о низкой эффективности применения ВЭУ. Экономический потенциал ветровой энергии гораздо ниже аналогичного показателя для солнечной энергии [14, 17].

На основе опубликованных в литературе данных [18–20] для расчётов сформированы два сценария – базовый и оптимистический (табл. 1). Первый соответствует технико-экономическим показателям, достигнутым в настоящее время, второй – прогнозным на перспективу 10-15 лет.

Таблица 1. Технико-экономические показатели рассматриваемых вариантов

Элемент	Удельные капиталовложения, \$/кВт	Постоянные издержки, % от капиталовложений	КПД, %	Срок службы, лет
Базовый сценарий (БАЗ)				
ФЭУ	900	1,5	20	20

ВЭУ	1600	3,0	30	30
Конвертер	400	1,0	97	15
Электролизёр*	1100	5,0	77	20
Компрессор	800	2,0	98	10
Ресивер**	400	1,0	95	25
(ёмкость для хранения)				
Оптимистический сценарий (ОПТ)				
ФЭУ	600	1,0	25	30
ВЭУ	1400	2,0	40	30
Конвертер	300	1,0	98	20
Электролизёр	600	3,0	83	25
Компрессор	600	1,0	98	20
Ресивер** (ёмкость для хранения водорода)	300	1,0	99	25

Примечания: * – на кВт выходной мощности; ** – на м³.

Рассмотрена электрическая нагрузка 500 кВт, характерная, например, для посёлка с населением 300-500 человек. Фотоэлектрическая система состоит из панелей единичной мощностью 445 Вт (солнечный модуль российской компании Хевел), ветроэлектрическая - производства ООО «ТЭМЗ» (Тюльганский электромеханический завод). Установленная мощность такой ВЭУ – 225 кВт, высота составляет 32 м, диаметр лопасти 9 м при ометаемой площади ветроколеса 64 м². Количество фотоэлектрических панелей и ветроустановок определялось в каждом из вариантов по результатам оптимизации. Расчеты проводились при годовой норме дисконта $d = 0,075$.

6 Результаты и их обсуждение

Стоимость водорода определяется стоимостью электроэнергии, электролизёра, компрессора, ёмкости для хранения водорода.

Как показывают расчёты, в условиях Дагестана стоимость электроэнергии в базовом сценарии для фотоэлектрических установок (ФЭУ) составляет 5-7 цент/кВт.ч и 6-9 для ВЭУ. В оптимистическом сценарии эти значения уменьшаются до 3-4 цент/кВт.ч для ФЭУ и 4-7 цент/кВт.ч для ВЭУ. Однако доля электроэнергии, производимой ФЭУ и ВЭУ, в общей стоимости водорода достаточно велика, но не является определяющей.

Зависимость стоимости водорода от климатических условий, характерных для Дагестана, показана на рис. 1.

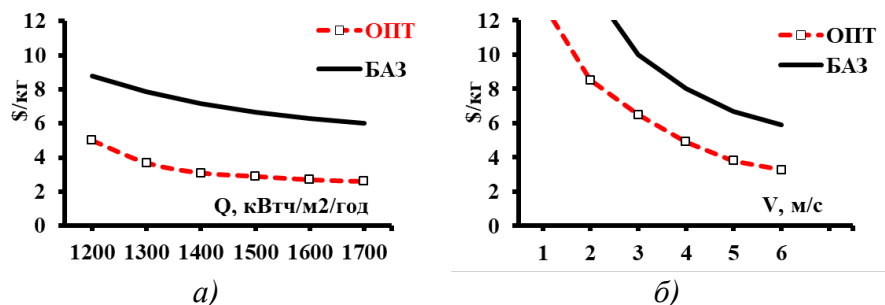


Рис. 1. Стоимость водорода, произведённого ФЭУ (а) и ВЭУ (б). БА3 – базовый сценарий, ОПТ – оптимистический сценарий

В процессе оптимизации автономной системы электроснабжения выявлено, что суммарная установленная мощность ФЭУ и ВЭУ оказывается больше мощности нагрузки. В связи с этим при изменении скорости ветра и интенсивности солнечного излучения из-за стохастического характера выработки ВИЭ часть вырабатываемой электроэнергии оказывается "избыточной". Такая "избыточная" (условно-бесплатная) электроэнергия может быть подана в электролизёр для получения дополнительного количества водорода и заполнения водородного бака (ресивера). Использование накопленного водорода в топливных элементах позволяет дублировать мощность ВИЭ и полностью отказаться от использования энергоисточников на органическом топливе.

На рис. 2 показана структура стоимости водорода при раздельном использовании ФЭУ и ВЭУ для разных климатических условий (ФЭУ1 и ВЭУ1 для худших условий; ФЭУ2 и ВЭУ2 для лучших условий) рассматриваемых двух сценариев технико-экономических показателей и при совместном их использовании в составе гибридных систем (ГС1 и ГС2). Видно, что в структуре затрат доля электроэнергии, производимой ФЭУ и ВЭУ, составляет до 20-30%. Другими важными составляющими являются затраты на электролизёр, компрессор и ресивер.

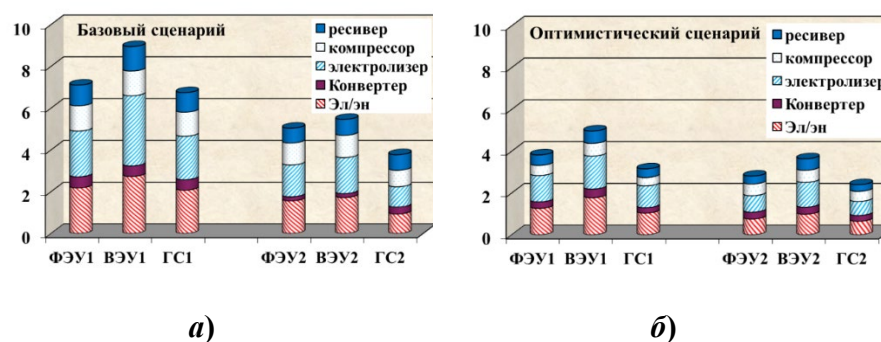


Рис 2. Стоимость водорода (\$/кг) для худших (ФЭУ1 и ВЭУ 1 и ГС1) и лучших климатических условий (ФЭУ2 и ВЭУ2 и ГС2) в базовом (а) и оптимистическом (б) сценариях

Структура стоимости водорода показана для базового и оптимистического сценариев технико-экономических показателей системы производства водорода и для худших (относительно неблагоприятных) ($Q=1300$ кВт·ч/м²/год и $V=4$ м/с) и лучших (благоприятных) ($Q=1600$ кВт·ч/м²/год и $V=6$ м/с) климатических условий Дагестана. При работе в составе гибридной системы при худших (ГС1) и лучших климатических условиях (ГС2) стоимость водорода снижается. При среднем приходе солнечной радиации на горизонтальную поверхность около 1400-1600 кВт·ч/м²/год климатические условия Дагестана максимально благоприятны по российским меркам для использования ФЭУ. Выработка ФЭУ в таких условиях будет примерно на 20-50% выше, чем в более северных районах России. Ветровые условия Дагестана не являются уникальными для России, тем не менее, средние многолетние скорости ветра 5-6 м/с представляют интерес для развития ветроэнергетики. На большей части территории Дагестана средние многолетние скорости ветра не превышают 4-5 м/с, поэтому стоимость электроэнергии от ФЭУ будет меньше, чем при использовании ВЭУ (рис. 2).

Стоимость «зелёного водорода» при раздельном использовании ФЭУ и ВЭУ составляет около 4-5 \$/кг. При хороших климатических условиях при совместном использовании энергоисточников стоимость эта величина снижается до 2-3 \$/кг (соответственно для оптимистического и базового сценариев).

При одновременной работе ФЭУ и ВЭУ они взаимно дополняют друг друга. В течение суток ВЭУ компенсируют отсутствие выработки ФЭУ в ночное время. Кроме того, производство электроэнергии от ФЭУ максимально в тёплый период года, а выработка ВЭУ имеет зимний максимум. Суммарная стоимость оборудования в варианте гибридной системы составит примерно 300 млн руб.

7 Заключение

Выполнены расчёты стоимости «зелёного водорода» при использовании электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими и ветроэлектрическими установками для климатических условий Дагестана.

При использовании "избыточной" электроэнергии в связи со стохастическим режимом выработки ФЭУ и ВЭУ в автономной системе электроснабжения стоимость производства «зелёного водорода» снижается. Для базового сценария она может достигнуть 3\$/кг (около 735 \$/т у.т.), для оптимистического – до 2 \$/кг (490 \$/т у.т.).

Эти результаты позволяют надеяться, что в перспективе «зелёный водород» в условиях Дагестана может оказаться экологически чистым и конкурентоспособным энергоносителем. Кроме того, водород может в дальнейшем вытеснять органическое (дизельное) топливо, особенно в отдалённых районах и при введении налогов на выбросы вредных веществ.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Литература

1. Веселов Ф., Соляник А. Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика. 2022. № 3. С. 58-67. DOI: 10.21122/10.46920/2409-5516_2022_4170_58
2. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., Salman H.M., Jaszczur M., Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 50, Part B, P. 310-333. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.321
3. Zainal B.S., Ker P.J., Mohamed H., Ong H.C., Fattah I.M.R., Ashrafur Rahman S.M., Nghiem L.D., Indra Mahlia T.M, Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 189, Part A. 113941. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113941
4. IRENA Renewable Capacity Statistics 2024. Abu Dhabi: IRENA, 2024. 72 p.
5. Renewables 2024. Global Status Report. Paris: REN 21, 2024. 51 p.
6. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers // International Journal of Low-carbon Technologies. 2010. Vol. 5, No.4. P. 250-255. DOI: 10.1093/ijlct/ctq031
7. Марченко О.В., Соломин С.В. Эффективность совместного использования возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 8. С. 111-121. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-111-121
8. Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Чернявский А. А. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том Выпуск 5, Том 1. 2015.— С. 78-90.
9. Алиев Р.М., Курбанов Ш.М., Давудов И.А., Абдулкадыров А.С. Стратегические приоритеты развития топливно-энергетического комплекса Республики Дагестан в современных условиях // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 3. С. 12-17. DOI: 10.21822/2713-220X-2022-3-3-12-17
10. Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А. Научно-прикладной справочник «Климат России». Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2022. [Электронный ресурс]: <http://ai-sori-m.meteo.ru/climsprn> (дата обращения 10 января 2025).
11. Атаев З.В., Эльдаров Э.М. Физическая география Дагестана. М: Школа, 1996. 396 с.
12. Ахмедова Л.Ш. Мощность солнечной радиации и ее распределение в высотных интервалах территории Дагестана // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16, № 1. С. 110-116. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-110-110-116
13. Дибиров М.Г., Амадзиева Н.А., Дибирова М.М. Техно-экономическая оценка использования систем солнечного теплоснабжения в Дагестане // Вопросы структуризации экономики. 2020. № 3. С. 25-30. DOI: 10.26159/APR.2020.81.3.004
14. Сутаев М. М., Алиев Р.Б, Самедова Н.С., Давудов И.А., Светличная Т.В. Оценка потенциала использования ветровой и солнечной энергии в Республике Дагестан //

- Окружающая среда и энергосодержание. 2024. №3. С.50-88. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-50-68
15. Амадзиева Н.А., Хизриев А.Ш. Эколого-экономическое обоснование использования солнечной энергии в Республике Дагестан // Региональные проблемы преобразования экономики. 2020. № 4. С. 71-76. DOI:10.26726/1812-7096-2020-04-71-76
 16. Дадашев А.М. Климатические условия Махачкалинской зоны Дагестана по данным гидрометеонаблюдений // Науки о Земле. 2013. № 4 (17). С. 27-34.12
 17. Амадзиева Н. А. Потенциал использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. № 9(155). С. 40-45. DOI: 10.26726/1812-7096-2023-9-40-45
 18. World Energy Outlook. IEA: Paris, 2022. 523 p.
 19. Petkov I., Gabrielli P. Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems // Applied Energy. 2020. Vol. 274. No. 115197. P. 1-25. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2020.115197
 20. Марченко О.В., Соломин С.В. Оценка экономической эффективности производства водорода с использованием энергии ветра и солнца // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 1. С. 80–87. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4622

References

1. Veselov F., Solyanik A. Ekonomika proizvodstva vodoroda s uchytom eksporta i rossijskogo rynka (Economics of hydrogen production, taking into account exports and the Russian market). *Energy policy*. 2022; 3:58-67. (In Russ). DOI: 10.21122/10.46920/2409-5516_2022_4170_58
2. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., Salman H.M., Jaszczur M., Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 50, Part B; 310-333. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.321
3. Zainal B.S., Ker P.J., Mohamed H., Ong H.C., Fattah I.M.R., Ashrafur Rahman S.M., Nghiem L.D., Indra Mahlia T.M, Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024; 189, Part A.: 113941. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113941
4. IRENA Renewable Capacity Statistics 2024. Abu Dhabi: IRENA, 2024. 72 p.
5. Renewables 2024. Global Status Report. Paris: REN 21, 2024. 51 p.
6. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers. *International Journal of Low-carbon Technologies*. 2010; 5 (4):250-255. DOI: 10.1093/ijlct/ctq031
7. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of renewable energy sources combined use. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017; 21 (8):111-121. (In Russ). DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-111-121
8. Alkhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B., Chernyavsky A.A. Possibilities of using renewable energy sources in the Republic of Dagestan // *Proceedings of the IV International Conference "Renewable Energy: Problems and Prospects" and the VIII School of Young Scientists "Actual Problems of Development of Renewable Energy Resources"* named after E.E. Shpilrain. 2015; 1(5):78-90.
9. Aliev R.M., Kurbanov Sh.M., Davudov I.A., Abdulkadyrov A.S. Strategic priorities for the development of the fuel and energy complex of the Republic of Dagestan in modern condi-

- tion // *Scientific research: results and prospects*. 2022; 3(3):12-17 (In Russ) DOI: 10.21822/2713-220X-2022-3-3-12-17
10. Veselov V.M., Pribyl'skaya I.P., Mirzeabasov O.A. Nauchno-Prikladnoy Spravochnik "Klimat Rossii". Scientific and Applied Reference Book "Climate of Russia"; VNIIGMI-MCD: Obninsk, Russia. 2022. (In Russ). Available online: <http://aisori-m.meteo.ru/climspm> (accessed on 10 January 2025).
 11. Ataev Z.V., Eldarov E.M. Physical geography of Dagestan. Moscow, 1996. 396 p. (In Russ)
 12. Akhmedova L. Sh. Solar radiation power and its distribution in altitude-latitude intervals of the territory of Dagestan. *South of Russia: ecology, development*. 2021; 6 (1):110-116. (In Russ). DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-110-116
 13. Dibirov M. G., Amadzieva N. A., Dibirova M. M. Technical and economic assessment of the use of solar heating systems in Dagestan. *Issues of structuring the economy*. 2020; 3:25-30. (In Russ). DOI: 10.26159/APR.2020.81.3.004
 14. Sutaev M. M., Aliyev R. B., Samedova N. S., Davudov I. A., Svetlichnaya T. V. Assessment of the potential for using wind and solar energy in the Republic of Dagestan. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*. 2024; 3:50-88. (In Russ). DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-50-68
 15. Amadzieva N.A., Khizriev A.Sh. Environmental and economic justification of the use solar energy in the Respublic of Dagestan. *Regional problems of economic transformation*. 2020; 4:71-76. (In Russ). DOI: 10.26726/1812-7096-2020-04-71-76
 16. Dadashev A.M. Climatic conditions of the Makhachkala zone of Dagestan according to hydrometeorological observations. *Earth Sciences*. 2013; 7 (17): 27-34.12. (In Russ)
 17. Amadzieva N.A Potential for the use of renewable energy sources in the Republic of Dagestan. *Regional problems of economic transformation*. 2023; 155: 40-45. (In Russ). DOI: 10.26726/1812-7096-2023-9-40-45
 18. World Energy Outlook. IEA, Paris, 2022. 523 p.
 19. Petkov I., Gabrielli P. Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems. *Applied Energy*. 2020; 274: 115197. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2020.115197
 20. Marchenko O.V., Solomin S.V. Economic efficiency assessment of hydrogen production using wind and solar energy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025; 336:80-87. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4622. (In Russ)

Assessment of the hydrogen costs using photovoltaic and wind turbines for the conditions of Dagestan

Oleg Marchenko ^{1,1}, Sergei Solomin ^{1,2}

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

E-mail: ¹ marchenko@isem.irk.ru, ² solomin@isem.irk.ru

Abstract. The aim of the study is to assess the economic efficiency of hydrogen production in Russia based on the use of renewable energy resources. Dagestan was chosen as an example, as a typical region with a high influx of solar radiation and acceptable wind conditions. At the first stage, the hydrogen cost from photovoltaic (PV) panels and wind turbines (WT) operating separately was determined for various technical and economic indicators of energy sources (business-as-usual and optimistic) and climatic conditions (average long-term values of solar insolation and wind speed). At the second stage of the study, the hydrogen cost for the combined operation of PV panels and WT in a single energy system was determined taking into account system effects. The optimization mathematical model Renewable Energy Model was used. It is shown that under favorable climatic conditions of Dagestan in the optimistic scenario of technical and economic parameters of solar power plants and wind turbines, the cost of hydrogen can be about 3 \$/kg. In an autonomous power supply system, due to the use of "excess" electricity from PV and WT that operate in a stochastic mode, it is possible to reduce the cost of hydrogen production to about 2 \$/kg.

Keywords: photovoltaic converters, wind turbines, hydrogen, electrolysis, hydrogen cost.

Acknowledgement. The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

УДК 631.4:546.79

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-123-134

EDN: WHGUCC

Вертикальное распределение тяжёлых металлов (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) в дерново-подзолистых почвах речной долины (на примере р. Канырка)

Ткаченко Никита Сергеевич ^[0009-0005-3919-6164]

ФГАОУ Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

E-mail: nikita.tkachenko1998@mail.ru

Аннотация. На основе полевых и лабораторных исследований изучено валовое содержание и вертикальное распределение тяжелых металлов (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) в дерново-подзолистых почвах элювиальных, трансэлювиальных и суперэлювиальных ландшафтов долины р. Канырка. Установлено, что концентрации всех исследуемых элементов (Pb: 6.9–15.5 мг/т; Tl: 0.20–0.40 мг/т; Sb: <0.10–0.31 мг/т; Bi: <0.01–0.14 мг/т; Ba: 470–560 мг/т) не превышают средние фоновые значения для дерново-подзолистых почв. Визуальный анализ кривых распределения выявил четкие закономерности: аккумуляция Pb и Tl в органогенных и иллювиальных горизонтах, иллювиальное накопление Sb в трансэлювиальной фации, интенсивный вынос Bi и инертное поведение Ba. Показано, что выявленные тренды являются индикатором естественных почвообразовательных процессов – подзолообразования, лессиважа и гумусонакопления, а геохимические особенности распределения элементов контролируются биогеохимическими барьерами и гранулометрическим составом почв. Полученные данные могут служить основой для регионального экологического мониторинга и установления местных фоновых концентраций.

Ключевые слова: тяжелые металлы, дерново-подзолистые почвы, вертикальное распределение, свинец, таллий, сурьма, висмут, барий, почвенные горизонты, геохимические барьеры, фоновое содержание.

1 Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки фоновое состояние почвенного покрова в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Изучение валового содержания и вертикальной дифференциации тяжелых металлов (ТМ) в почвах речных долин позволяет выявить закономерности их миграции и аккумуляции в системе «почва–грунтовые воды» и служит основой для выявления антропогенной трансформации геохимических циклов [1,14]. Дерново-подзолистые почвы, как один из распространенных типов почв лесной зоны, являются чувствительным индикатором как природных, так и антропогенных геохимических процессов [2].

Особый интерес представляет изучение не только широко мониторируемых элементов, таких как свинец, но и менее исследуемых, но высокотоксичных металлов, к которым относятся таллий, а также металлоидов (сурьма) [3]. Их поведение в почвенных профилях, особенно в условиях разной гидротермики и геохимической обстановки (элювиальные, трансэлювиальные и супераккумуляционные фации), изучено недостаточно особенно в контексте речных долин Западной Сибири[4].

2 Материалы и методы

Район исследования выбран в качестве модельного полигона как типичный элемент ландшафта южнотасжской подзоны Западной Сибирской равнины. Исследования проводились в долине реки Канырка — малой водной артерии (длина 19 км), правого притока реки Тура (бассейн Оби), протекающей в подзоне южной тайги Западно-Сибирской равнины. Территория характеризуется плоским, слабо-расчленённым рельефом с широким развитием ландшафтов, включающих супераккумуляционные фации в понижениях и дерново-подзолистых почв на дренированных участках. Долина реки выбрана в качестве модельного полигона как типичный элемент ландшафта региона, испытывающий минимальную прямую антропогенную нагрузку (отсутствие промышленных объектов и крупных населённых пунктов в непосредственной близости), что позволяет изучать фоновые геохимические процессы. Ближайший крупный источник потенциального воздействия — г. Тюмень (около 42 км к юго-востоку), что делает данную территорию репрезентативной для оценки фоновое состояние почв и выявления дальнего переноса загрязняющих веществ.

Разрезы заложены на правом берегу долины р. Канырка на расстоянии 100 м от уреза воды, примерно в 12 км от устья. Все разрезы находятся на слабоволнистой поверхности первой надпойменной террасы, испытывающей влияние паводковых вод в экстремальные периоды. Микрорельеф — ровный (перепады высот не превышают 0,3 м). Растительный покров представлен сосново-берёзовым лесом с разнотравьем. Визуальные признаки прямой антропогенной нагрузки (мусор, колеи, вырубки) в местах отбора проб отсутствуют. Отбор образцов проводился в августе 2023 г. в период устойчивого низкого уровня грунтовых вод.



Рис.1 Схема расположения заложённых разрезов

Таблица 1. Координаты разрезов	57.31974 64.96545
Л-1	
Л-2	57.31986 64.96504
Л-3	57.32002 64.96476

Исследования проводились в долине р. Канырка. Были заложены и описаны 3 почвенных разреза на дерново-подзолистых почвах в соответствии с общепринятыми методиками [6, 7]:

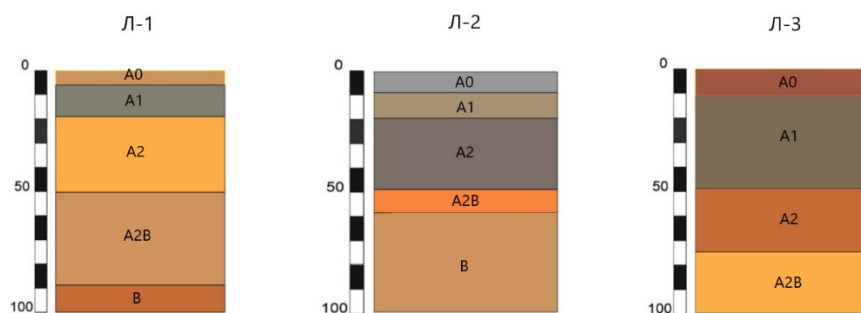


Рис.2 Почвенные профили дерново-подзолистой почвы

Разрез Л-1 – элювиальная фация (Э), профиль: A0+A1+A2+A2B+B (мощность 0–100 см).

· Разрез Л-2 – трансэлювиальная фация (ТЭ), профиль: A0+A1+A2+A2B+B (мощность 0–100 см).

· Разрез Л-3 – условно супераквальная фация (СА), профиль: A0+A1+A2+A2B (мощность 0–100 см). Наличие морфологически выраженного подзолистого горизонта (A2) в условиях периодического переувлажнения может указывать на реликтовый характер почвообразования или формирование почвы в более дренированных микроположениях террасы, что требует дальнейших палеопочвенных исследований.

Глубина исследования ограничена 100 см, так как именно в этой толще почвенного профиля сосредоточены основные миграционно-аккумуляционные процессы, формирующие вертикальную дифференциацию элементов. Вскрытие материнской породы не входило в задачи работы, сфокусированного на почвенных горизонтах.

Отобраны почвенные пробы послойно с интервалом 10 см. Валовое содержание металлов определялось методом ICP-MS/AES в условиях аккредитованной аналитической лаборатории.

Обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel.

3 Результаты и их обсуждение

1. Общая характеристика почвенных профилей.

Морфологическое описание разрезов свидетельствует о хорошо выраженной элювиально-иллювиальной дифференциации всех изученных профилей, что является диагностическим признаком подзолистого типа почвообразования [6]. Для всех разрезов характерно наличие органогенного горизонта A0, гумусово-элювиального горизонта A1, осветленного элювиального горизонта A2 и иллювиального горизонта B (или переходного A2B). Отмечается закономерное изменение гранулометрического состава от легкого суглинка в элювиальной части профиля к среднему и даже тяжелому суглинку в его иллювиальной части, что формирует важный физико-химический (сорбционный) барьер для мигрирующих веществ [8].

2. Анализ валового содержания и вертикального распределения тяжелых металлов

Для обоснования фонового характера содержаний тяжелых металлов в почвах долины р. Каньрка проведено сравнение полученных данных с опубликованными средними (кларковыми) и региональными фоновыми значениями для дерново-подзолистых и таежных почв (Таблица 2.3). Сопоставление показывает, что концентрации Pb, Tl, Sb, Bi и Ba в исследуемых почвах находятся в пределах или ниже средних значений для ненарушенных аналогов [2, 8, 13, 15]. В частности, содержание свинца (6.9–15.5 мг/т) значительно ниже среднего кларка для почв

(20 мг/т) и характерного диапазона для фоновых дерново-подзолистых почв (10–25 мг/т) [8, 13]. Аналогично, концентрации Тl, Sb и Bi соответствуют нижней границе или не превышают их типичные фоновые уровни. Содержание Ba (470–560 мг/т) также соответствует средним значениям для данного типа почв. Таким образом, можно утверждать, что исследуемые дерново-подзолистые почвы долины р. Каньрка характеризуются фоновыми уровнями концентраций изучаемых элементов, а сама территория может рассматриваться как условно-фоновая (эталонная) для южнотажной подзоны Западной Сибири.

Это позволяет рассматривать их вертикальное распределение, прежде всего, как результат природных геохимических и почвенных процессов.

Таблица 2. Диапазон валового содержания тяжелых металлов в почвенном разрезе, мг/т (Л-1)

Pb	Tl	Sb	Bi	Ba	Глубина, см
12,6	0,30	0,141	0,085	541	(0-10)
8,71	0,25	0,185	0,040	544	(10-20)
9,37	0,26	0,114	0,040	538	(20-30)
9,52	0,26	<0.10	0,041	551	(30-40)
9,85	0,26	<0.10	0,044	514	(40-50)
10,6	0,24	<0.10	0,041	553	(50-60)
9,14	0,23	<0.10	0,024	504	(60-70)
9,40	0,26	0,148	0,025	556	(70-80)
11,5	0,33	0,31	0,065	517	(80-90)
12,6	0,30	0,141	0,085	541	(90-100)

Таблица 2.1. Диапазон валового содержания тяжелых металлов в почвенном разрезе, мг/т (Л-2)

Pb	Tl	Sb	Bi	Ba	Глубина, см
9,94	0,27	0,28	0,061	512	(0-10)
9,38	0,27	0,154	0,048	503	(10-20)
9,53	0,26	0,140	0,043	530	(20-30)
8,19	0,25	0,27	0,030	486	(30-40)
9,22	0,22	<0.10	0,028	516	(40-50)
8,99	0,28	0,176	0,076	499	(50-60)
10,9	0,35	0,25	0,137	493	(60-70)
12,4	0,35	0,23	0,130	521	(70-80)
15,5	0,40	0,27	0,147	555	(80-90)
15,5	0,40	0,27	0,147	555	(90-100)

Таблица 2.2. Диапазон валового содержания тяжелых металлов в почвенном разрезе, мг/т (Л-3)

Pb	Pt	Sb	Bi	Ba	Глубина, см
7,58	0,20	0,31	<0.010	468	(0-10)
6,90	0,21	0,20	<0.010	475	(10-20)
8,65	0,22	0,166	0,029	475	(20-30)
7,42	0,21	0,133	<0.010	485	(30-40)
8,23	0,20	0,104	0,013	481	(40-50)
9,15	0,21	0,105	0,010	476	(50-60)
7,27	0,21	0,117	0,010	492	(60-70)
8,55	0,24	0,138	0,032	503	(70-80)
8,75	0,27	0,20	0,045	493	(80-90)
8,63	0,27	0,183	0,060	481	(90-100)

Таблица 2.3. Сравнение валового содержания тяжелых металлов в почвах долины р. Канырка с фоновыми значениями (мг/т)

Элементы	Диапазон в почвах р. Канырка	Средний кларк (фоновое содержание) для дерново-подзолистых почв (литературные данные)	Источники
Pb	6,9 – 15,9	10 – 25	[8,13]
Pt	0,20 – 0,40	0,1 – 0,5	[2,3]
Sb	0,10 – 0,31	0,2 – 1,0	[2,8]
Bi	0,01 – 0,14	0,1 – 0,5	[2,8]
Ba	470 – 560	300 – 600	[8,13]

3. Визуальный анализ кривых вертикального распределения

Анализ графиков распределения, построенных на основе данных таблиц, наглядно демонстрирует разнонаправленное поведение элементов в почвенном профиле.

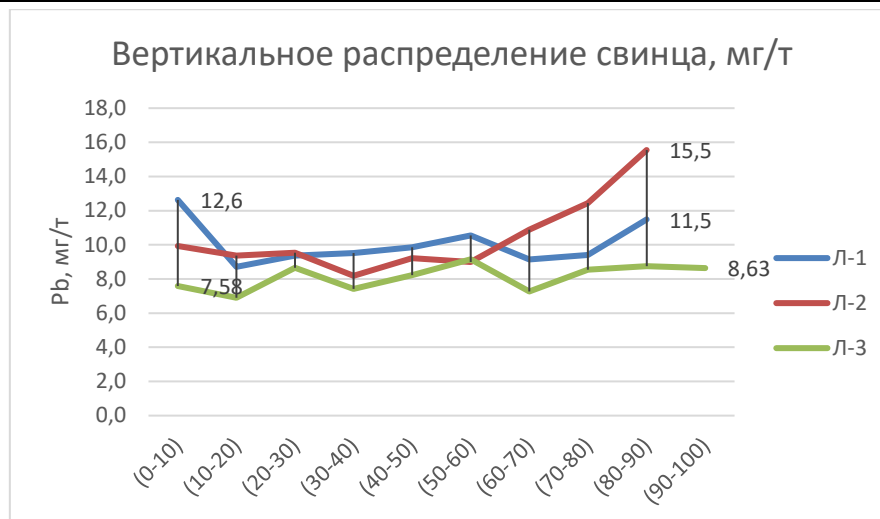


Рис. 3. Вертикальное распределение свинца, мг/т

В разрезе Л-1 кривая имеет слабовыраженный максимум в верхнем горизонте (0-10 см, 12.6 мг/т), после чего наблюдается относительное плато. В разрезе Л-2 выявлен аномальный тренд -- монотонный рост концентрации с глубиной с ярко выраженным максимумом в горизонте 80-90 см (15.5 мг/т), что может указывать на его привнос с боковой миграцией и аккумуляцию в иллювиальной зоне. В супераквальном разрезе Л-3 распределение Рb носит слабодифференцированный характер, что согласуется с гипотезой об усилении процессов выноса и перераспределения элементов в условиях периодического переувлажнения и восстановительной обстановки, типичных для супераквальных фаций [6,12].

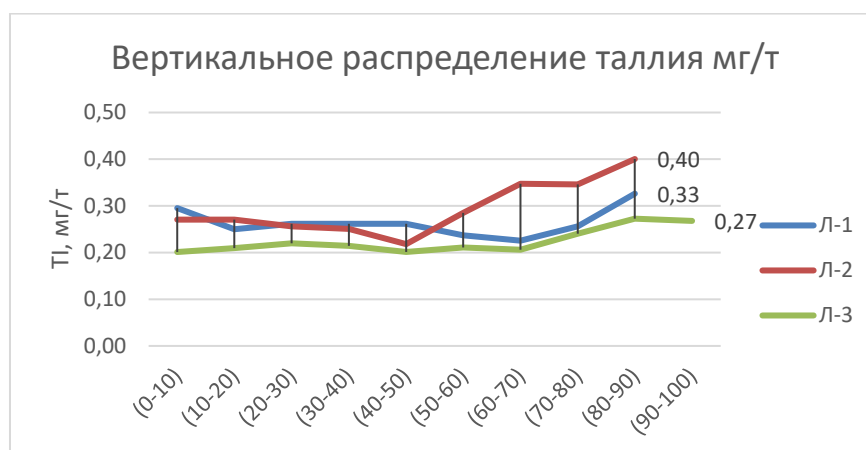


Рис. 4. Вертикальное распределение таллия, мг/т

Таллий (Tl). Графики для разрезов Л-1 и Л-2 демонстрируют бимодальное распределение с максимумами в приповерхностных слоях (0-20 см) и в иллювиальной части (70-90 см), наглядно иллюстрируя двойственную природу миграции Тl, способного к биогенному накоплению и осаждению на иллювиальном барьере. В разрезе Л-3 кривая имеет слабовыраженный иллювиальный максимум, согласующийся с супераквальными условиями.

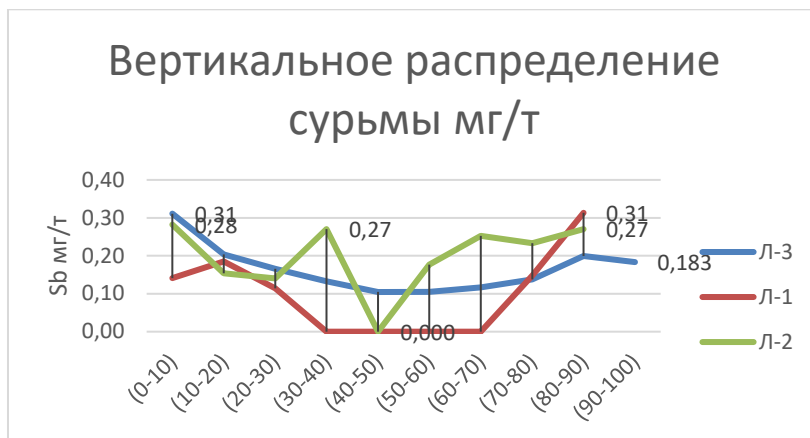


Рис. 5. Вертикальное распределение сурьмы, мг/т

Сурьма (Sb). Визуализация подтверждает кардинальные различия между фациями. В разрезе Л-1 большая часть кривой находится ниже предела обнаружения, с единичными всплесками. В то же время, в разрезе Л-2 кривая имеет четкий иллювиальный максимум в горизонтах 30-70 см (0,27–0,28 мг/т), являясь визуальным доказательством аккумуляции анионных форм Sb в трансэлювиальной фации. В разрезе Л-3 распределение относительно равномерное.

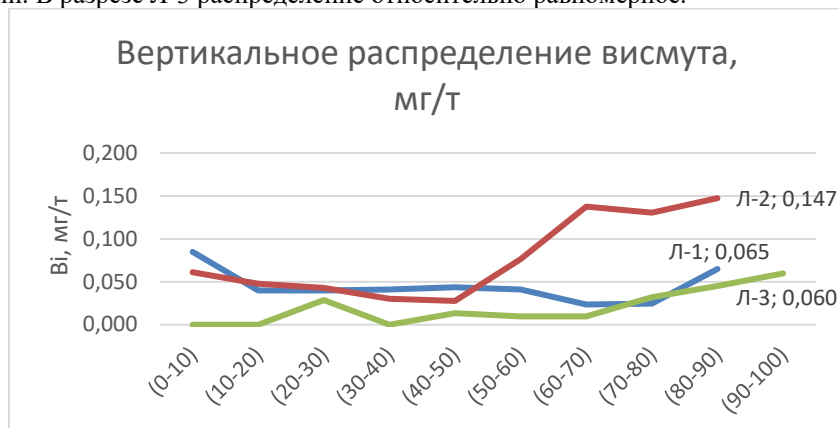


Рис. 6. Вертикальное распределение висмута, мг/т

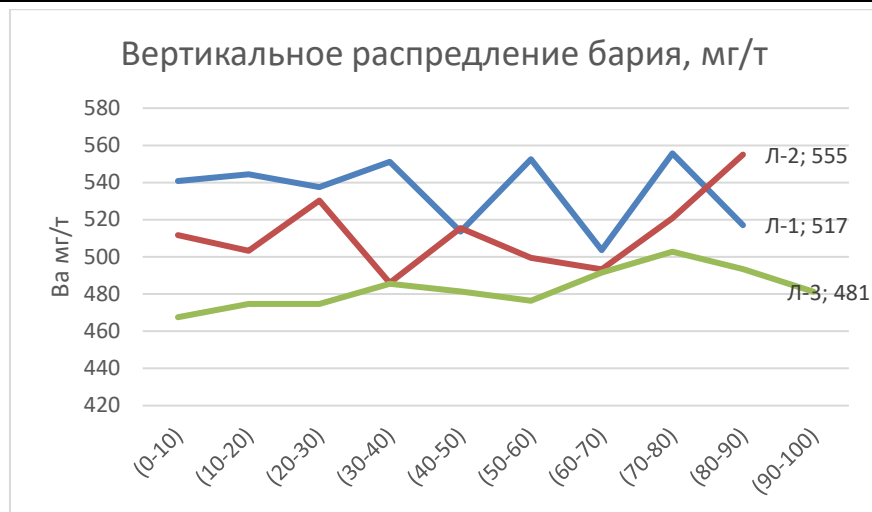


Рис. 7. Вертикальное распределение бария, мг/т

Висмут (Bi) и Барий (Ba). Кривые для Bi визуально подтверждают его интенсивный вынос -- значения в большинстве точек лежат вблизи или ниже предела обнаружения, что характерно для его геохимически рассеянного поведения в кислых почвах подзолистого типа [2, 8]. Напротив, кривые распределения Ba представляют собой относительно ровные линии, наглядно демонстрируя его литофильную природу и слабую подвижность в почвенных условиях.

Проведенное исследование показало, что содержание тяжелых металлов в почвах долины р. Каньрка соответствует природным фоновым уровням. Это, с одной стороны, подтверждает, что выбранная территория не подвержена значительному локальному антропогенному воздействию, а влияние дальнего переноса из г. Тюмень (42 км) на валовое содержание не выявлено. С другой стороны, установленные концентрации и выявленные закономерности их вертикального распределения теперь могут служить конкретным количественным эталоном (локальным фоном) для дерново-подзолистых почв речных долин южной тайги Западной Сибири. Эти данные необходимы для будущего экологического мониторинга, так как позволяют точно определить «точку отсчета» и выявить даже незначительные отклонения, вызванные хозяйственной деятельностью.

4 Выводы

Проведенное исследование и сравнение с литературными данными показало, что валовое содержание тяжелых металлов (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) в дерново-подзолистых почвах долины р. Каньрка соответствует средним фоновым значениям для данного типа почв Западно-Сибирской равнины. Это позволяет рекомендо-

вать полученные диапазоны концентраций в качестве локального геохимического фона (эталона) для оценки состояния почв в аналогичных ландшафтах региона.

2. Визуальный анализ кривых вертикального распределения выявил четкие и разнообразие закономерности, контролируемые фазией почвообразования:

Свинец и таллий демонстрируют сложную динамику с признаками аккумуляции на органогенном и иллювиальном геохимических барьерах; сурьма проявляет четкую тенденцию к иллювиальному накоплению в трансэлювиальной фазии; висмут характеризуется низкими концентрациями по всему профилю, что является типичным для его поведения в кислых подзолистых почвах и подтверждает гипотезу об интенсивном выносе в условиях элювиально-иллювиальной дифференциации; барий визуально демонстрирует инертное поведение и слабую дифференциацию по профилю, характерные для литофильных элементов.

3. Выявленные тренды являются индикатором естественных почвообразовательных процессов (подзолаобразования, лессиважа, гумусонакопления) и подтверждают, что геохимические особенности распределения элементов контролируются биогеохимическими барьерами и гранулометрическим составом почв.

Полученные данные о фоновых концентрациях и поведении тяжелых металлов в системе почвенных горизонтов могут служить основой для регионального экологического мониторинга, установления местных фоновых концентраций и выявления будущих антропогенных нарушений.

4. Наличие дерново – подзолистых почв с выраженным подзолистым горизонтом на первой надпойменной террасе требует дополнительного изучения. Для объяснения этого феномена выдвинута гипотеза о реликтовом характере почвообразования или формирования почв в особых микроклиматических условиях дренированных микроповышений, что может стать темой дальнейших исследований.

Литература

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 86 с.
3. Волохова М.А., Водяницкий Ю.Н. Таллий в почвах: анализ, содержание, поведение (обзор) // Почвоведение. 2020. № 3. С. 291–305.
4. Field guide for soil description. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. 97 p.
5. Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А. Субстантивно-генетическая классификация почв России // Почвоведение. 2019. № 4. С. 387–399.
6. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

8. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413 p.
9. Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы формирования элементарных ландшафтов // География, общество, окружающая среда. 2004. Т. II. С. 209–222.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв. М.: Гаудеамус, 2007. 237с.
12. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
13. Reimann C., de Caritat P. Chemical Elements in the Environment: Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 398 p.
14. Саг Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335с.
15. Alloway B.J. (Ed.). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer, 2013. 614 p.

References

1. Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1970. 487 p.
2. Vodyanitsky Yu.N. Heavy metals and metalloids in soils. Moscow: GNU Soil Institute named after V.V. Dokuchaev, 2008. 86 p.
3. Volokhova M.A., Vodianitsky Yu.N. Thallium in soils: analysis, content, behavior (review) // Soil Science. 2020. No. 3. pp. 291-305.
4. Field handbook on soil description. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. 97 p.
5. Gerasimova M.I., Gubin S.V., Shoba S.A. Substantial genetic classification of Russian soils. 2019. No. 4. pp. 387-399.
6. Glazovskaya M.A. Geochemical foundations of typology and methods of natural landscape research. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1964. 230 p.
7. Ilyin V.B. Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk: Nauka Publ., 1991. 151 p.
8. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413 p.
9. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of formation of elementary landscapes // Geography, society, environment. 2004. Vol. 2. pp. 209-222.
10. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p.
11. Motuzova G.V., Bezuglova O.S. Ecological soil monitoring. Moscow: Gaudeamus, 2007. 237s.
12. Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of the landscape. Moscow: Astraea-2000, 1999. 768 p.
13. Reiman K., de Carita P. Chemical elements in the environment: reference books for geochemists and environmental scientists. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 398 p.
14. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. and others. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra, 1990. 335s.
15. Alloway B.J. (ed.). Heavy metals in soils: trace elements and metalloids in soils and their bioavailability. Springer, 2013. 614 p.

Vertical distribution of heavy metals (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) in sod-podzolic soils of a river valley (on the example of Kanyrka river)

Nikita Tkachenko

Tyumen State University, Tyumen, Russia

E-mail: nikita.tkachenko1998@mail.ru

Abstract. Based on field and laboratory studies, the gross content and vertical distribution of heavy metals (Pb, Tl, Sb, Bi, Ba) in sod-podzolic soils of eluvial, transeluvial, and superaqueous landscapes of the Kanyrka River valley were studied. It was found that the concentrations of all the studied elements (Pb: 6.9–15.5 mg/t; Tl: 0.20–0.40 mg/t; Sb: <0.10–0.31 mg/t; Bi: <0.01–0.14 mg/t; Ba: 470–560 mg/t) do not exceed the average background values for sod-podzolic soils. Visual analysis of the distribution curves revealed clear patterns: accumulation of Pb and Tl in organogenic and illuvial horizons, illuvial accumulation of Sb in the transeluvial facies, intensive removal of Bi, and inert behavior of Ba. It is shown that the identified trends are an indicator of natural soil-forming processes - podzol formation, loessage and humus accumulation, and the geochemical features of the distribution of elements are controlled by biogeochemical barriers and the granulometric composition of soils. The data obtained can serve as a basis for regional environmental monitoring and the establishment of local background concentrations.

Keywords: heavy metals, sod-podzolic soils, vertical distribution, lead, thallium, antimony, bismuth, barium, soil horizons, geochemical barriers, background content.

УДК 55.556

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-135-148

EDN: ZBMQRG

Особенности годового хода инсоляции и гидрологического режима рек и родников Горного Крыма

Фёдорова Екатерина Валерьевна ^[0000-0001-8054-2763],
Фёдоров Валерий Михайлович ^[0000-0003-2305-7408]

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

E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Аннотация. В результате проведенного гидрологического мониторинга и анализа полученных результатов определена тесная связь годового хода расхода воды в реке Бельбек с годовым ходом объема воды в исследуемых горных родниках. Полученный результат подтверждает предположение о преимущественно родниковом питании реки Бельбек. Определена тесная отрицательная связь годового хода расхода воды в реке Бельбек, объема воды в родниках в районе горного сельского поселения Солнечноселье с годовым ходом инсоляции. При этом, отмечается запаздывание по фазе минимумов (максимумов) годового хода объема воды в родниках и расхода воды в реке Бельбек относительно максимумов (минимумов) инсоляции приблизительно на три месяца.

Ключевые слова: гидрологический мониторинг, годовой ход, инсоляция, горный Крым, река Бельбек расход воды, горные родники

1 Введение

Одной из составляющих природных ресурсов являются климатические условия территории. Важнейшей характеристикой климатических условий является температурный режим, определяющий многие особенности жизни населения, окружающей природной среды и хозяйственной деятельности в регионе. Главными климатообразующими факторами Крыма в целом являются: радиационные и циркуляционные факторы, рельеф, а также влияние Черного и Азовского морей [1; 2; 3]. Формирование поверхностных вод Крыма в значительной мере определяется особенностями климата, рельефа и геологического строения полуострова. По водному режиму реки Крыма относятся к рекам с паводочным режимом

крымского типа: паводки наблюдаются в зимне-весенний и летне-осенний периоды. На паводковые периоды приходится 80–95 % годового стока [4; 5]. Однако, в гидрологическом режиме рек горного Крыма активно проявляется динамика подземного стока, которая до настоящего времени исследована недостаточно. Родники являются объектом многих исследовательских проектов связанных с природоохранной деятельностью. Известны исследовательские проекты, целью которых является изучение геохимического, минералогического состава родниковых вод. Географические исследования сезонной динамики объема воды в родниках сельских поселений горного Крыма ранее не проводились.

В работе исследуются особенности годового хода объема воды в родниках горного Крыма и годового хода инсоляции в Крыму. Цель исследований – определение основного типа питания р. Бельбек и характера связи в сезонной динамике инсоляции [6; 7] и гидрологическом режиме родников и рек в горных районах Крыма (на примере долины реки Бельбек – наиболее полноводной реки крымского полуострова).

2 Водные ресурсы Крыма

Территория Крыма продуцирует около миллиарда кубометров воды в год. В Крыму насчитывается 1657 рек и временных водотоков общей длиной 5996 км. Около 150 из них реки со среднемноголетним стоком 0,58 км³. Это главным образом малые реки длиной до 10 км. На территории Крыма насчитывается более 430 прудов и водохранилищ, с общей поверхностью полного зеркала около 27 км² (площадь водохранилищ около 14 км²), а их полезная водоотдача составляет 180 млн. м³ [8].

Основные реки Крыма: Салгир, Кача, Альма, Бельбек, Индол, Биюк-Карасу, Чёрная, Бурульча. Самой протяженной является река Салгир (220 км), самой полноводной – река Бельбек (средний за год расход воды около 2,0 м³/с). Средняя густота речной сети для всего Крыма составляет 0,22 км/км² [5; 9].

Формирование поверхностных вод Крыма в значительной мере определяется особенностями климата, рельефа и геологического строения полуострова. Вследствие жаркого климата, незначительного количества атмосферных осадков в степных районах, а также широкого распространения в горных районах карста, большая часть Крыма бедна поверхностными и подземными водами. Гидрографическая сеть Крыма представлена на рис. 1.

По территории Крыма реки распределены крайне неравномерно, что связано с факторами подстилающей поверхности – рельефом, геологическим строением, гидрогеологическими и метеорологическими условиями, растительным покровом. В Крыму выделяют горно-лесную и равнинно-степную территории. По яйлам Главной горной гряды проходит главный водораздел Крыма, поверхность которого характеризуется типичным карстовым рельефом. Здесь поверхностные водотоки отсутствуют, а выпадающие атмосферные осадки за счёт слагающих Главную гряду верхнеюрских мраморизованных известняков, характеризую-

щихся высокой степенью трещиноватости и карстопроявления переходят в подземный сток, который является основным источником питания большинства рек Крымского полуострова. Поэтому на высотах 600–1100 м, где расположено много родников, находятся истоки большинства крымских рек. Реки, берущие начало на южном макросклоне гор, протекают по южному побережью Крыма и впадают в Чёрное море. Реки северного макросклона относятся как к бассейну Чёрного, так и Азовского морей. Густота речной сети Горного Крыма составляет 0,7 км/км² [4, 5].



Рис. 1. Схема гидрографической сети центрального и западного Крыма [5]

На Горный Крым приходится 85 % стока, на равнинный Крым и Керченский полуостров всего 15 % [5]. Общий объем стока с поверхности Крыма составляет 0,56 км³. Эти суммарные водные ресурсы рек полуострова распределяются по его отдельным районам крайне неравномерно. Удельные водные ресурсы горной части в 32 раза превышают ресурсы равнинной степной части Крыма. Степной

Крым с удельными водными ресурсами в 3 тыс. м³ в год на 1 км² практически является бессточной областью. Водные ресурсы рек Крыма резко изменяются от года к году вследствие частого чередования многоводных и маловодных лет. В многоводные годы они могут быть в 2–3 раза больше, а в маловодные – в 2–3 раза меньше, чем в средние по водности годы [8].

Таким образом, в Крыму часто складываются кризисные ситуации, когда из-за установления засушливой погоды резко падают объемы стока рек, а потребность в этой воде для орошения сельскохозяйственных культур, наоборот, возрастает. В связи с этим возникает необходимость строительства прудов и водохранилищ для межсезонного и межгодового перераспределения потребления водных ресурсов [8].

По водному режиму реки Крыма относятся к рекам с паводочным режимом крымского типа: паводки наблюдаются в зимне-весенний и летне-осенний периоды. На паводковые периоды приходится 80–95 % годового стока [4, 5]. Весеннее половодье четко не выделяется, так как во время снеготаяния часто идут дожди. Летние ливневые паводки чаще всего бывают в июне и июле. Паводки холодного периода нередко превышают летние и также бывают катастрофическими. Самые высокие уровни воды наблюдаются не одновременно на реках разных групп. На реках северо-западных склонов Крымских гор они могут быть в любом месяце с декабря по июль, на реках южного берега – чаще всего в период с декабря по апрель, на реках северных склонов Крымских гор – в феврале – апреле, а на реках и балках степного Крыма – летом, после дождей. Подъемы уровня воды в реках во время паводков – от 2 до 6 м. Наиболее высоки они на реках северо-западных склонов Крымских гор, особенно на Бельбеке и Черной. Самые низкие уровни воды в реках наблюдаются обычно в июле – сентябре. Тогда же многие реки вообще пересыхают на 2–3, а иногда на все 12 месяцев [10].

Водные режимы рек Крыма сильно видоизменены вследствие создания в их разных частях регулирующих водохранилищ и заборных устройств воды на орошение [5].

3 Проблемы водоснабжения в Крыму

На территории Крыма водные ресурсы распределены неравномерно. В связи с этим в отдельных районах полуострова проблема водоснабжения (обеспечение хозяйственных и бытовых потребностей в воде) представляется актуальной. Масштабность этой проблемы возрастает в засушливые годы [9].

Естественными для Крыма являются засухи разной продолжительности и интенсивности (в среднем, за 10 лет отмечается 4 засушливых года). Масштабная проблема пресной воды возникла в Крыму после того, как Украина в мае 2014 года перекрыла подачу воды в Крым из Херсонской области по Северо-Крымскому каналу (канал обеспечивал до 85 % потребностей полуострова в воде). Летом 2021 года в Крыму возникла экологическая проблема, связанная с нехваткой воды, как следствие обмеления водохранилищ на полуострове за последние три года из-за засухи.

4 Водоснабжение сельских поселений в горных районах Крыма

Основными источниками воды для хозяйственных и бытовых нужд населения Крыма являются артезианские скважины, водохранилища естественного стока и наливные водохранилища Северо-Крымского канала. Для сельских горных поселений основу водопотребления составляют колодезная, родниковая вода и атмосферные осадки. Горные поселения расположены в основном в южной части полуострова. В связи с особенностями геологического строения Крыма объем воды в колодцах и родниках со временем изменяется. Кроме того, на динамику объема воды влияет режим атмосферных осадков (рис. 2).

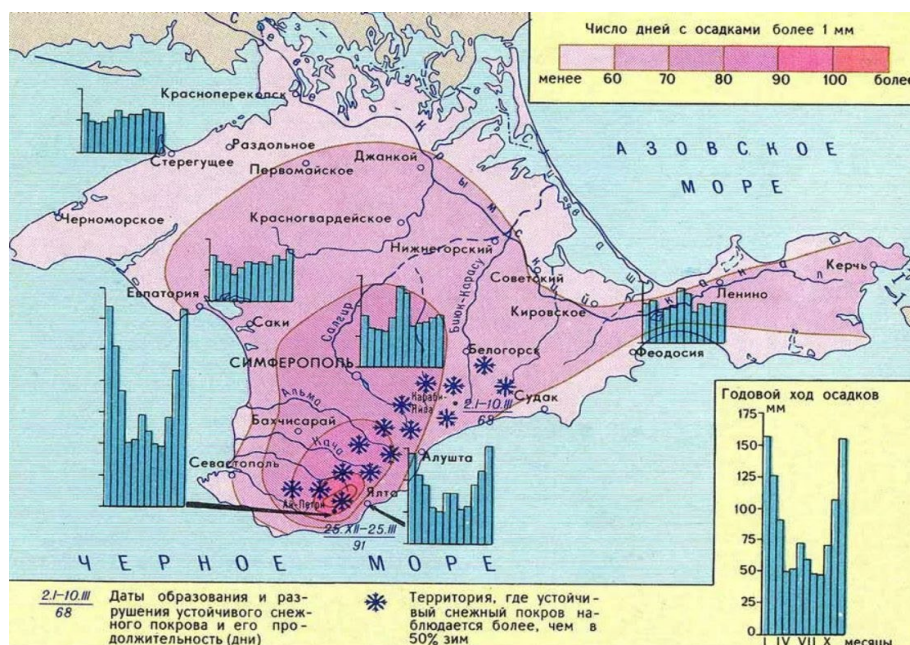


Рис. 2. Распределение и сезонный ход атмосферных осадков на территории Крыма [11].

Однако, связи между объемами воды в родниках, колодцах и продолжительностью, интенсивностью атмосферных осадков сложные. Речной сток также зависит от многих факторов (в том числе с таким как несовпадение поверхностных и подземных водосборов), поэтому его колебания имеют более сложный характер по сравнению с атмосферными осадками. Это хорошо просматривается при анализе динамики годовых расходов воды в реках [5].

Из-за значительных различий в сезонном ходе атмосферных осадков в различных районах Крыма, а также в связи с неоднородностью геологического строения, наблюдается сложная картина изменения объема воды в родниках разных

районов горного Крыма. Поскольку, родниковая вода является одним из основных источников водоснабжения в горных районах, то проведение локального мониторинга и на его основе исследование сезонной динамики объема воды в родниках представляется актуальным для решения вопросов рационального использования местных водных ресурсов и повышения устойчивости водоснабжения горных поселений. Информация о расположении родников и вероятном содержании воды в них в тот или иной период года также может быть полезной при организации и проведения туристических маршрутов и экскурсий в горных районах Крыма.

Целью работы являются исследования сезонной динамики объема воды в родниках горного Крыма (район Солнечноселья, рис. 3) и анализа ее связи с сезонной динамикой расхода воды в р. Бельбек и годовым ходом солнечной радиации на широте Крыма.



Рис. 3. Район проведения исследований (выделен красным).

5 Методика исследований

Локальный мониторинг объема воды в родниках на основе волонтерской инициативы начат авторами в июле 2019 года на двух родниках («Верхнем» и «Нижнем» – объекты исследований), расположенных в верхней части горного сельского поселения Солнечноселье (Бахчисарайский район). Координаты родников определялись по GPS. Был точно измерен объем емкости «Нижнего» родника. Родник «Нижний» оборудован искусственной цилиндрической формой, размеры которой определялись инструментальными измерениями (рис. 4).

Приблизительно рассчитан объем естественной емкости для «Верхнего» родника. Емкость родника «Верхний» аппроксимировалась цилиндром, за диаметр основания которого принималось среднее значение измеренной на разных высотных уровнях ширины емкости (рис. 5).

В дальнейшем, еженедельно измерялись высоты уровня воды в родниках и, по этой переменной рассчитывался объем воды в них. По недельным значениям осреднением за месяц вычислялись среднемесячные значения объема воды в родниках. Исследуемые родники расположены в долине реки Бельбек. Данные по среднемесячному расходу воды в реке Бельбек получены из предоставленных нам результатов наблюдений на гидропосту Куйбышево. Данные по солнечной радиации (на верхней границе атмосферы) на широте полуострова Крым получены на основе расчетов инсоляции (табл. 1).



Рис. 4. Родник «Нижний» (фото Е.В.Федоровой)
(44°36.55 с.ш., 33°56.43 в.д., абсолютная высота 491 м)



Рис. 5. Родник «Верхний» (фото Е.В.Федоровой)

Таблица 1. Среднемесячные значения расхода воды в реке Бельбек и инсоляции на широте полуострова Крым.

Месяцы года	Расход воды, м³/с	Инсоляция, Вт/м²
Январь	2,31	147,07
Февраль	3,59	195,49
Март	4,12	276,81
Апрель	3,89	365,71
Май	1,92	437,95
Июнь	1,51	477,23
Июль	0,74	475,34
Август	0,63	433,24
Сентябрь	0,59	360,37
Октябрь	0,91	272,80
Ноябрь	1,98	193,43
Декабрь	2,47	146,51

6 Методика расчётов инсоляции

Расчеты инсоляции выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-441) [12, 13] 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 были: склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего координатного времени (Coordinate Time) и всемирного корректируемого времени (Universal Time). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом Geodetic Reference System 1980 (GRS80) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

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

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м²), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ_1, φ_2 – географические широты, выраженные в радианах; $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида (Вт/м²), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Изменение активности Солнца в расчетах не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее

многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2 [14]. Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли солнечной энергии изложена в [3, 15, 16, 17].

Сопоставление сезонной динамики объема воды в родниках с сезонной динамикой расхода воды в реке Бельбек (среднего за период 1951–2021 гг.) и инсоляцией (за 2020–2021 гг.) на широте Крыма (широтная зона $40^\circ\text{--}45^\circ$ с.ш.) проводилось на основе корреляционного анализа.

7 Результаты и их обсуждение

Годовой ход запасов воды за два полных (2020 и 2021) года наблюдений на роднике «Верхний» представлен на рис. 6. На роднике «Нижний» – на рис. 7.

Для родника «Верхний» максимум объема воды отмечается в апреле, минимум – в августе. Среднемесячный объем воды в 2020 г. составлял $0,16 \text{ м}^3$, а в засушливом 2021 г. – $0,11 \text{ м}^3$. Максимальные запасы воды (апрель) в роднике в нормальном году (2020 г.) оцениваются в $0,21 \text{ м}^3$, в засушливом 2021 г. в $0,14 \text{ м}^3$. Минимальные (август) запасы воды в 2020 г. составляли $0,12 \text{ м}^3$, в 2021 г. – $0,05 \text{ м}^3$.

Для родника «Нижний» максимум объема воды также отмечается в апреле, минимум – в августе. Среднемесячный объем воды в 2020 г. составлял $0,76 \text{ м}^3$, а в засушливом 2021 г. – $0,59 \text{ м}^3$. Максимальные запасы воды (апрель) в роднике оцениваются в нормальный год (2020 г.) в $0,86 \text{ м}^3$, в засушливый (2021 г.) в $0,66 \text{ м}^3$. Минимальные (август) запасы воды в 2020 г. составляли $0,64 \text{ м}^3$, в 2021 г. – $0,41 \text{ м}^3$.

Проведен корреляционный анализ годового хода объема воды в родниках с годовым ходом расхода воды в реке Бельбек (родники находятся в пределах площади водосбора). Коэффициент корреляции (R) для родника «Верхний» в 2020 году составил 0,93, в 2021 г. – 0,86. Для родника «Нижний» коэффициент корреляции в 2020 году оказался равным 0,86, в 2021 г. – 0,83. Таким образом, определяется тесная связь в годовом ходе между расходом воды в реке Бельбек и объемом воды в родниках в районе сельского поселения Солнечноселье. Полученными результатами может подтверждаться преимущественно родниковое питание реки Бельбек, определяемое характером подземного водосбора.

Также выполнен корреляционный анализ для годового хода инсоляции и расхода воды в реке Бельбек. При сопоставлении синхронных месячных значений статистически значимая связь не обнаружена. Как следует из табл. 1. максимум инсоляции отмечается в июне, а минимум расхода воды в сентябре (через три месяца). Минимум инсоляции приходится на декабрь, а максимум расхода – на март (также спустя три месяца). Таким образом, расход воды в реке Бельбек изменяется в противофазе с годовым ходом приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, при этом экстремумы годового хода отстают на три месяца от противоположных экстремумов инсоляции. При смещении годового хода расхода воды на три месяца в будущее, коэффициент корреляции составляет -0,83.

Сопоставлялась сезонная динамика объема воды в родниках с годовым ходом инсоляции. В роднике «Нижнем» (рис. 7) максимум содержания воды отмечается в марте, а минимум – в августе. Следовательно, минимум объема воды (август) отстает от максимума инсоляции (июнь) на два месяца. Максимум в объеме воды (март) запаздывает относительно минимума инсоляции на три месяца. После смещения годового хода объема воды на три месяца в будущее связь между переменными характеризуется коэффициентом корреляции равным -0,97 для 2020 г. и -0,72 для 2021 года.

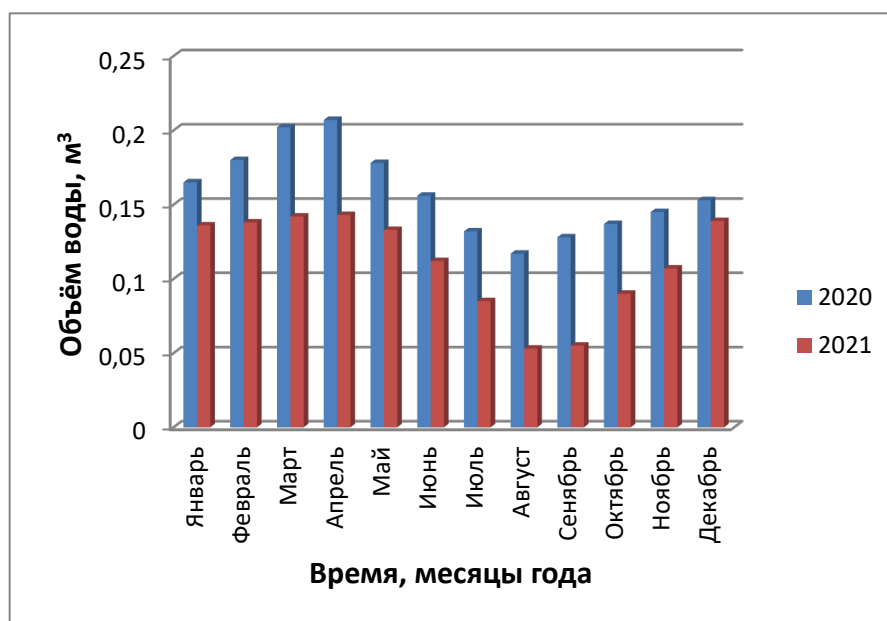


Рис. 6. Изменение объема воды в роднике «Верхний»

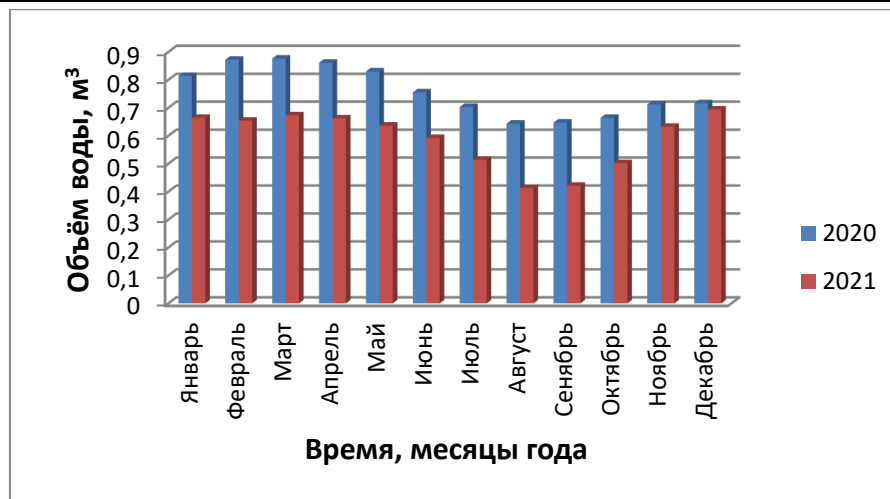


Рис. 7. Изменение объема воды в роднике «Нижний»

В роднике «Верхнем» (рис. 6) максимумы объема воды отмечаются в апреле, а минимумы в августе. В этом случае, минимум объема воды также на два месяца отстает от максимума инсоляции, но максимум объема воды отстает от минимума инсоляции уже на четыре месяца. При смещении сезонного хода объема воды на два месяца вперед, значения R составляют $-0,90$ и $-0,93$ для 2020 г. и 2021 г. соответственно. При смещении на три месяца значения R соответственно равны $-0,93$ и $-0,82$.

Таким образом, определяется тесная связь годового хода расхода воды в реке Бельбек с годовым ходом объема воды в родниках расположенных вблизи горного сельского поселения Солнечноселье (Бельбекская долина). Полученный результат подтверждает предположение о преимущественно родниковом питании реке Бельбек. Выявляется тесная отрицательная связь годового хода расхода воды в реке Бельбек, объема воды в родниках в районе горного сельского поселения Солнечноселье с годовым ходом инсоляции (солнечной радиации на верхней границе атмосферы). При этом, отмечается запаздывание по фазе минимумов (максимумов) годового хода объема воды в родниках и расхода воды в реке Бельбек относительно максимумов (минимумов) инсоляции приблизительно на три месяца.

8 Заключение

В результате проведения локального мониторинга и анализа полученных данных определен объем водных ресурсов в родниках «Верхний» и «Нижний» и характер его изменений в течение года (нормального – 2020 г. и засушливого – 2021 г.). Максимум водопотребления приходится на период с мая по сентябрь, то есть

совпадает с минимальными запасами воды в родниках, что создает риски в обеспечении водоснабжения домохозяйств. Следовательно, точный учет состояния водных родниковых ресурсов особенно важен для планирования хозяйственной деятельности и регулирования бытовых расходов воды.

Найдены связи в сезонной динамике объема воды в родниках Бельбекской долины с сезонной динамикой расхода воды в реке Бельбек, что указывает на ее преимущественно родниковое питание. Определена тесная отрицательная связь годового хода расхода воды в реке Бельбек и объема воды в родниках (вблизи горного сельского поселения Солнечноселье) с годовым ходом инсоляции. При этом смещение по фазе составляет, приблизительно три месяца. Полученные связи гидрологического режима горных рек и родников Крыма и инсоляции могут стать основой оценочного прогноза расхода воды в реке Бельбек на основе, рассчитанной в будущее инсоляции на широте полуострова Крым [18].

Информация о состоянии родников и объеме воды в них может оказаться полезной при организации проведения туристических маршрутов и экскурсий в районах горного Крыма. Организация волонтерского мониторинга родников, может способствовать и решению экологических задач направленных на борьбу с загрязнением водных ресурсов, поскольку родники дают начало многим крымским рекам.

Литература

1. Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1967. 296 с.
2. Fedorov V. M., Gorbunov R. V., Gorbunova T. Yu. and N. K. Kononova N. K. Long-Term Air Temperature Variability on the Crimean Peninsula // *Geography and Natural Resources*, 2017. V. 38. No. 1. Pp. 86–92. DOI: 10.1134/S1875372817010115
3. Fedorov V.M. Analysis of the components of a different physical nature in the interannual variability of the total solar irradiance flux // *Solar System Research*, 2019. V. 53. № 5. Pp. 70–76. DOI:10.1134/S0038094619040026
4. Тимченко З.В. Водные ресурсы и экологическое состояние малых рек Крыма. – Симферополь. Доля, 2002. 152 с.
5. Тимченко З.В. Гидрография и гидрология рек Крыма. Симферополь. ИТ «Ариал», 2012. 290 с.
6. Федоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // *Геориск*, 2020. Т. 14. № 4. С. 16–29. DOI:10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29
7. Федоров В.М. Статистические оценки межгодовых колебаний климата. Вестник Московского ун-та. Серия 5, география, 2001. № 1. С. 16–19.
8. Разработка экологически сбалансированных способов защиты и восстановления водных объектов на территории Крыма / Ред. В.А. Боков. Симферополь, 2013. 211 с.
9. Подгородецкий П.Д. Крым: Природа. Симферополь. Таврия, 1988. 192 с.
10. Трансформация структуры водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века и её оптимизация / Ред. Боков В.А. Симферополь. Крымский научный центр, 2011. 193 с.
11. Ведь И. П. Климатический атлас Крыма / Ред. Ведь И. П. Симферополь.: Таврия–Плюс, 2000. 120 с.

12. Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., Kuchynka, P. The planetary time series. *Reviews of Geophysics*, 2014. 40, 3–1–3–41.
13. <http://ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.
14. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*, 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777
15. Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости инсоляции Земли с суточным разрешением // *Астрономический вестник*, 2016. Т. 50. № 3. С. 233–238. DOI: 10.7868/S0320930X16030014.
16. Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // *Астрономический вестник*, 2012. Т. 46. № 2. С. 184–189
17. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 // *Springer Geology*, 2020. V. I. Pp. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
18. Федоров В.М., Федорова Е.В., Залиханов А.А. Оценочный прогноз изменений отдельных компонентов природной среды на основе регрессионной модели // *Окружающая среда и энерговедение*, 2022, №1. С. 62–80.

References

1. Borisov A.A. The climates of USSR (in Russ.). M.: Prosveschenie, 1967. 296 pp.
2. Fedorov V. M., Gorbunov R. V., Gorbunova T. Yu. and N. K. Kononova N. K. Long-Term Air Temperature Variability on the Crimean Peninsula. *Geography and Natural Resources*, 2017, V. 38, 1, 86–92. DOI: 10.1134/S1875372817010115
3. Fedorov V.M. Analysis of the components of a different physical nature in the interannual variability of the total solar irradiance flux. *Solar System Research*, 2019. V. 53, 5, 70–76. DOI:10.1134/S0038094619040026
4. Timchenko Z.V. Water resources and environmental status of Crimea's small rivers (in Russ.). – Simferopol', Dolya, 2002. 152 pp.
5. Timchenko Z.V. Hydrography and hydrology of Crimea's rivers (in Russ.). Simferopol', IT Arial, 2012. 290 p.
6. Fedorov V.M. Evolution of the Earth's modern global climate and its possible causes (in Russ.). *Georisk*, 2020. vol. 14, 4, 16–29. DOI:10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29
7. Fedorov V.M. Statistical estimates of interannual climate fluctuations (in Russ.). *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 2001, 1, 16–19.
8. Development of environmentally balanced ways to protect and restore water bodies in the territory of Crimea (in Russ.). / Ed. V.A. Bokov. Simferopol', 2013. 211 pp.
9. Podgorodetskiy P.D. Crimea: Nature (in Russ.). Simferopol', Tavriya, 1988. 192 pp.
10. Transformation of the water balance structure in Crimea in 20th and the beginning of 21 century and its optimization (in Russ.). / Ed. V.A. Bokov. . Simferopol'. Crimean scientific centre, 2011. 193 pp.
11. Ved' I. P. Climate atlas of Crimea (in Russ.). / Ved' I. P. imferopol': Tavriya –Plus, 2000. 120 pp.
12. Folkner, W. M., Williams, J. G., Boggs, D. H., Park, R. S., Kuchynka, P. The planetary time series. *Reviews of Geophysics*, 2014. 40, 3–1–3–41.
13. <http://ssd.jpl.nasa.gov>. – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Website of NASA.

14. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*, 2011. V. 37. L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777
15. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the Earth insolation interannual variability with daily resolution (in Russ) *Solar System Research (Astronomicheskii Vestnik)*, 2016. vol. 50, 3, 233–238. DOI: 10.7868/S0320930X16030014.
16. Fedorov V.M. Theoretical calculation of the solar constant interannual variability (in Russ.). *Solar System Research (Astronomicheskii Vestnik)*, 2012. vol. 46, 2. 184–189
17. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 // *Springer Geology*, 2020. V. I. Pp. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
18. Fedorov V.M., Fedorova E.V., Zalikhanov A.M. Estimative forecast of changes in the individual components of environment based on a regression model. (in Russ.). *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 2022, 1, 62–80.

Features of insolation annual course and hydrological regime of Mountainous Crimea's rivers and springs

Ekaterina Fedorova, Valery Fedorov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Abstract. Hydrological monitoring together with an analysis of its results determines a close relationship between the annual course of water discharge in Bel'bek River and the annual course of water volume in the studied mountain springs, confirming an assumption about the predominant spring feeding of the Bel'bek River. A close negative relationship has been determined between the annual course of water consumption in the Bel'bek River and the volume of water in springs in the area of the Solnechnoselye mountain rural settlement and the annual course of insolation. At the same time, there is a delay in the phase of minima (maxima) of the annual flow of water volume in springs and water consumption in the Belbek region relative to the maxima (minima) of insolation by about three months.

Keywords: hydrological monitoring, annual course, insolation, mountainous Crimea, Bel'bek river, water discharge, mountain springs