eISSN 2658-6703

Окружающая среда и энерговедение

Journal of Environmental Earth and Energy Study

2026
№3(31)

НАУКА
1727

ISSN 2658-6703 (online)

Окружающая среда и энерговедение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2026 №3(31)

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

Основан в 2018 г.

Founded in 2018

Выходит 4 раза в год
при научно-информационной поддержке
Географического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Published 4 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 7.12.2018.

ИндексируетсявНЭБeLIBRARY.RU, «КиберЛенинка»,
PublicKnowledgeProject, OpenArchivesInitiative, OpenAIRE.

С 12.02.2024 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).
Включен в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ) — «Белый список» (уровень К3).

http://jeees.ru

© ФГБУ «Издательство «Наука» (учредитель), 2026
© Редакция журнала «Окружающая среда и энерговедение», 2026

Редакционная коллегия

Залиханов Михаил Чоккаевич – главный редактор, д.г.н., проф., академик РАН, советник РАН, науч. руковод. Высокогорного геофизического института Росгидромета (Нальчик, РФ)
Дегтярев Кирилл Станиславович – зам. главного редактора, к.геогр.н., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Соловьев Дмитрий Александрович – отв. секретарь редакции, к.ф.-м.н., Ин-т океанологии РАН (Москва, РФ)

Авезова Нилуфар Раббанакуловна – к.т.н., проф., Ферганский гос. тех. ун-т (Фергана, Узбекистан)
Афанасьев Олег Евгеньевич – д.г.н., проф., Южный федер. ун-т, Мелитопольский гос. ун-т, Сочинский гос. ун-т, Издательство «Наука» (Москва, РФ)
Бабурин Вячеслав Леонидович – д.г.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Безруких Павел Павлович – д.т.н., академик-секретарь Российской Инженерной Академии, МЭИ (Москва, РФ)
Берёзкин Михаил Юрьевич – к.геогр.н., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Бушуев Виталий Васильевич – д.т.н., проф., гл. науч. сотр. ОИВТРАН (Москва, РФ)
Гулев Сергей Константинович – д.ф.-м.н., проф., академик РАН, Ин-т океанологии РАН (Москва, РФ)
Добролюбов Сергей Анатольевич – д.геогр.н., проф., академик РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Залиханов Алим Михайлович – к.геогр.н., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Киселева Софья Валентиновна – к.ф.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Красовская Татьяна Михайловна – д.геогр.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
НефедоваЛюдмилаВениаминовна – к.геогр.н., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Нигматулин Роберт Искандерович – д.ф.-м.н., проф., академик РАН, Ин-т океанологии РАН (Москва, РФ)
Показеев Константин Васильевич – д.ф.-м.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
РафиковаЮлия Юрьевна – к.геогр.н., МГУ им. М.В. Ломоносова(Москва, РФ)
Слипенчук Михаил Викторович – д.э.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)
Тикунов Владимир Сергеевич – д.геогр.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, РФ)

Editorial board

Mikhail Ch. Zalikhanov– Editor-in-Chief, PhD (Dr.Sc., Geogr.), Prof., Academician of the RAS, Advisor of the RAS, Scientific Director of the High-Mountain Geophysical Institute of Rosgidromet (Nalchik, Russia)
Kirill S. Degtyarev – Deputy Editor-in-Chief,PhD (Geogr.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Dmitry A. Solovyev – Managing Secretary, PhD (Phys.-Math.), Shirshov Institute of Oceanology RAS (Moscow, Russia)

Nilufar R. Avezova – PhD (Tech.), Prof., Fergana State Technical University (Fergana, Uzbekistan)
Oleg E. Afanasiev – PhD (Dr.Sc., Geogr.), Prof., Southern Federal University, Melitopol State University, Sochi State University, Nauka Publishing House (Moscow, RF)
Vyacheslav L. Baburin – PhD (Dr.Sc., Geogr.), Prof., Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Pavel P. Bezrukikh – PhD (Dr.Sc.,Tech.), Academic Secretary of the Russian Engineering Academy, National Research University Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russia)
Mikhail Yu. Berezkin – PhD(Geogr.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Vitaly V. Bushuev – PhD (Dr.Sc.,Tech.), Prof., Leading Researcher, Institute of Oceanology and Marine Technology RAS (Moscow, Russia)
Sergey K. Gulev – PhD (Dr.Sc.,Phys.-Math.), Prof., Academician of the RAS, Shirshov Institute of Oceanology RAS (Moscow, Russia)
Sergey A. Dobrolyubov – PhD (Dr.Sc.,Geogr.), Prof., Academician of the RAS, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Alim M. Zalikhanov – PhD (Geogr.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Sofya V. Kiseleva – PhD (Phys.-Math.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Tatyana M. Krasovskaya – PhD (Dr.Sc.,Geogr.), Prof., Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Lyudmila V. Nefedova – PhD(Geogr.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Robert I. Nigmatulin – PhD (Dr.Sc., Phys.-Math.), Prof., Academician of the RAS, Shirshov Institute of Oceanology RAS (Moscow, Russia)
Konstantin V. Pokashev – PhD (Dr.Sc., Phys.-Math.), Prof., Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yulia Yu. Rafikova – PhD (Geogr.), Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Mikhail V. Slipenchuk – PhD (Dr.Sc.,Econ.), Prof., Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Vladimir S. Tikunov – PhD (Dr.Sc.,Geogr.), Prof., Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

В этом номере вначале идут публикации специального раздела «Исследования на морских карбоновых полигонах России», а затем (со стр. 141) – другие статьи номера.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Исследования на морских карбоновых полигонах России

Research at Russian Marine Carbon Supersites

Ольчев А.В., Мысленков С.А. Исследования на морских карбоновых полигонах России: от наблюдений за потоками парниковых газов к интегральной оценке климатической роли морских экосистем	5	**Olchev A.V., Myslenkov S.A.** From greenhouse gas flux observations to an integrated assessment of the climate-regulating role of marine ecosystems: insights from marine carbon supersites in Russia
Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Латковская Е.М., Пищальник В.М., Романюк В.А., Никулина И.В. К вопросу об оценке пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а в прибрежной полынье Охотского моря	23	**Zarubina, D.V., Shumilov, I.V., Latkovskaya E. M., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Nikulina, I.V.** On the issue of assessing the spatiotemporal variability of chloro-phyll-a concentration in the coastal polynya of the Sea of Okhotsk
Романюк В.А., Латковская Е.М., Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Пищальник В.М., Никулина И.В. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного CO_2, хлорофилла-а и температуры поверхности моря в Охотском море: региональный фон и особенности залива Анива	37	**Romanyuk V.A., Latkovskaya E.M., Zarubina D.V., Shumilov I.V., Pishchalnik V.M., Nikulina I.V.** Seasonal and interannual variability of atmospheric CO_2, chlorophyll-a, and sea surface temperature in the Sea of Okhotsk: regional background and distinctive features of Aniva Bay
Мысленков С.А., Ильин В.И., Архипкин В.С., Пищальник В.М., Латковская Е.М. Анализ уровня моря и скорости течений в заливе Анива (Охотское море) по данным измерений и моделирования	53	**Myslenkov S.A., Ilin V.I., Arkhipkin V.S., Pishchalnik V.M., Latkovskaya E.M.** Analysis of sea level and current velocity in Aniva Bay (Sea of Okhotsk) based on measurements and modeling data
Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А. Сезонные оценки первичной продукции на карбоновом полигоне в северо-восточной части Черного моря	73	**Mosharov S.A., Fedorov A.V., Rebetskaya E.A.** Seasonal estimates of primary productivity at the carbon supersite in the northeastern Black Sea
Никулина И.В., Шумилов И.В., Мысленков С.А., Латковская Е.М., Пищальник В.М., Романюк В.А., Зарубина Д.В., Антонов Ю.А. Сезонная изменчивость накопления макрофитов в прибрежной зоне зал. Анива	85	**Nikulina, I.V., Shumilov I.V., Myslenkov S.A., Latkovskaya E.M., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Zarubina D.V., Antonov Yu.A.** Seasonal variability of macrophyte accumulation in the coastal zone of Aniva Bay
Кочкина М.В., Пушкин В.В., Полухин А.А., Ольчев А.В., Гулев С.К. Сезонная и пространственная изменчивость почвенных потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа	105	**Kochkina M.V., Pushkin V.V. Polukhin A.A., Olchev A.V., Gulev S.K.** Seasonal and spatial variability of soil CO_2 and CH_4 fluxes in natural ecosystems of the coastal area of the carbon supersite on the Black Sea coast of the North Caucasus
Мысленков С.А., Лямкина В.А., Романюк В.А. Сезонная и межгодовая изменчивость потоков CO_2 и CH_4 на территории России по данным спутников	128	**Myslenkov S.A., Lyamkina V.A., Romanyuk V.A.** Seasonal and interannual variability of CO2 and CH_4 fluxes in Russia based on satellite data
Соловьев Д.А. Национальный суверенитет в моделировании углеродного баланса России	141	**Solovyev D.A.** National sovereignty in modeling Russia's carbon balance
Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Развитие углеродного рынка в Китае	157	**Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., Sinyugin O.A.** Development of the carbon market in China

Кенжаев И.Г., Турсунбаев Ж.Ж., Ощепкова Э.А., Шерматова М.Б., Халиков А.А., Сиддиков Х.З. Эколого-экономическая эффективность внедрения солнечных фотоэлектрических систем различной мощности в Кыргызской Республике: сетевые, автономные и гибридные сценарии	174	**Kenjaev I.G., Tursunbaev Zh.Zh., Oshchepkova E.A., Shermatova M.B., Khalikov A.A., Siddikov Kh.Z.** Ecological and economic efficiency of implementing solar photovoltaic systems of different capacities in the Kyrgyz Republic: grid-connected, autonomous and hybrid scenarios
Ткаченко Н.С. Редкоземельные элементы (Sm, Gd, Pr, Tb) в профилях солодей Нижнетавдинского и Ярковского районов Тюменской области	190	**Tkachenko N.S.** Rare earth elements (Sm, Gd, Pr, Tb) in the malt of the Nizhnetavdinsky and Yarkovsky districts of Tyumen region
Федоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М. Особенности изменений годового и месячного облучения Земли в фазах нутационного цикла	199	**Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M.** Features of changes in annual and monthly irradiation of the Earth in the phases of the nutation cycle
Чекарев К.В., Залиханов А.М. Подвесная энергетическая установка с ветроколесом с поворотными жёсткими парусами	219	**Chekarev K.V., Zalikhanov A.M.** Outboard power plant with a windwheel with pivoting rigid sails

ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОРСКИХ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНАХ РОССИИ

УДК: 551.584.4
DOI: 10.7868/S2658670326030017

Исследования на морских карбоновых полигонах России: от наблюдений за потоками парниковых газов к интегральной оценке климатической роли морских экосистем

Ольчев Александр Валентинович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-6144-5826; e-mail: aoltche@yandex.ru

Мысленков Станислав Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются концептуальные основы исследований потоков парниковых газов на морских карбоновых полигонах России. Подчеркивается важность мониторинга и систематических комплексных исследований потоков парниковых газов в различных природных условиях, включая прибрежные и морские экосистемы. Затрагиваются вопросы стандартизации измерений, процедур обработки и представления данных, необходимых для последующего анализа результатов, полученных на карбоновых полигонах. Приводятся отдельные результаты исследований, ранее выполненных на морских карбоновых полигонах России. Завершает статью краткий обзор публикаций, включенных в специальный выпуск «Исследования на морских карбоновых полигонах России».

Ключевые слова: карбоновые полигоны, парниковые газы, CO_2, Черное море, Охотское море

Благодарности. *Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания (проект № FMWE-2026-0001)*

Для цитирования: Ольчев А.В., Мысленков С.А. Исследования на морских карбоновых полигонах России: от наблюдений за потоками парниковых газов к интегральной оценке климатической роли морских экосистем // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 5–22. DOI: 10.7868/S2658670326030017

Дата поступления в редакцию: 07.08.2026
Дата принятия к публикации: 15.09.2026

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

UDC: 551.584.4
DOI: 10.7868/S2658670326030017

From greenhouse gas flux observations to an integrated assessment of the climate-regulating role of marine ecosystems: insights from marine carbon supersites in Russia

Alexander V. Olchev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-6144-5826; e-mail: aoltche@yandex.ru

Stanislav A. Myslenkov
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Abstract. This article outlines a conceptual framework for studying greenhouse gas fluxes in marine carbon supersites in Russia. It emphasizes the importance of long-term monitoring and systematic, integrated investigations of greenhouse gas fluxes under various environmental conditions, particularly in coastal and marine ecosystems. It also addresses the standardization of measurement techniques, data processing procedures, and data reporting. These are essential for ensuring the comparability of observations obtained across different carbon supersites and for subsequent integrated analysis. Selected findings from earlier studies conducted at Russian marine carbon supersites are reviewed. The article concludes with a brief overview of the contributions included in the special issue, "Research at Russian Marine Carbon Supersites."

Keywords: carbon supersites, greenhouse gases, CO_2, Black Sea, Sea of Okhotsk

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the state assignment (project No. FMWE-2026-0001)

For citation: Olchev A.V., Myslenkov S.A. (2026). From greenhouse gas flux observations to an integrated assessment of the climate-regulating role of marine ecosystems: insights from marine carbon supersites in Russia. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3,* 5–22. doi: 10.7868/S2658670326030017 (in Russ.).

Received: 07.08.2026
Accepted: 15.09.2026

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

Введение

Современные изменения климата становятся одним из важнейших факторов, определяющих условия функционирования природных экосистем и характер их взаимодействия с атмосферой. Рост глобальной температуры, изменения гидрологического режима, трансформация криосферы, а также увеличение повторяемости и интенсивности экстремальных погодных и климатических явлений являются ключевыми проявлениями происходящей трансформации климатической системы. Воздействуя на наземные, пресноводные и морские экосистемы, эти процессы способны изменять интенсивность и направленность физических, биогеохимических и биологических процессов, включая обмен веществом и энергией между экосистемами и окружающей средой [1, 2].

В основе наблюдаемого глобального потепления лежит антропогенное усиление парникового эффекта, обусловленное прежде всего изменением состава атмосферы и ростом концентрации долгоживущих парниковых газов [2]. Вместе с тем реакция климатической системы на антропогенное воздействие не сводится к прямому следствию увеличения выбросов диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и других парниковых газов. Климатическая система реагирует на это воздействие через сложный комплекс взаимосвязанных физических, химических и биогеохимических процессов, включающих изменения углеродного, теплового и водного обмена, альбедо подстилающей поверхности, количество облачности, аэрозольных характеристик атмосферы, особенностей общей циркуляции атмосферы и океана, а также системы положительных и отрицательных обратных связей [3, 4, 5]. Существенная роль в формировании этих обратных связей принадлежит природным экосистемам, которые, реагируя на изменение климатических условий, одновременно способны изменять интенсивность и направленность обмена веществом и энергией с окружающей средой.

В этой системе океан и морские экосистемы занимают особое место. С одной стороны, океан является одним из ключевых компонентов глобального углеродного цикла и существенно замедляет накопление антропогенного CO_2 в атмосфере. Согласно современным оценкам, в последние десятилетия океан в среднем поглощал около четверти антропогенных выбросов CO_2. За период 2015–2024 гг. среднегодовая величина этого поглощения оценивается примерно в 3,2 ± 0,4 Pg C год$^{-1}$, при этом его интенсивность отличается значительной межгодовой изменчивостью [6, 7]. Динамика поглотительной способности океана связана не только с увеличением содержания антропогенного CO_2 в атмосфере, но и с изменениями океанических процессов, влияющих на перенос и перераспределение углерода между различными компонентами океанической системы.

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

На региональном уровне обмен CO_2 между океаном и атмосферой характеризуется существенной пространственной неоднородностью [8]. Конкретная величина и направление потока через границу «океан–атмосфера» зависят от сочетания ряда механизмов, включая температурный контроль растворимости CO_2, циркуляцию и вертикальное перемешивание водных масс, биологическую продукцию, дыхание и минерализацию органического вещества, а также поступление вещества с суши [7, 9]. Наиболее сложный характер взаимодействие этих процессов приобретает в прибрежной зоне. Здесь обмен CO_2 и трансформация углерода формируются под совместным воздействием речного стока, гидродинамических процессов и взаимодействия водной толщи с донными отложениями, а также биологической продукции, дыхания и трансформации органического вещества. Несмотря на то, что некоторые современные обобщающие оценки указывают на преобладание интегрального нетто-поглощения атмосферного CO_2 прибрежными морскими акваториями, отдельные регионы могут существенно различаться как по величине, так и по направлению обмена CO_2 с атмосферой [10].

Именно поэтому оценка климатической роли морских экосистем требует дифференцированного анализа процессов, определяющих обмен отдельными парниковыми газами и трансформацию углерода. Обобщенные характеристики, описывающие экосистему как «поглотитель» или «источник» углерода, не всегда позволяют адекватно отразить сложную структуру происходящих процессов. Направление и интенсивность обмена CO_2 с атмосферой, биологическая фиксация углерода, трансформация органического вещества и его долговременное накопление представляют собой взаимосвязанные, но не тождественные процессы.

Поток CO_2 через границу «атмосфера–море» характеризует направление и интенсивность газообмена между морской поверхностью и атмосферой. Этот показатель не эквивалентен величине первичной продукции и тем более не может непосредственно интерпретироваться как мера долговременной секвестрации углерода [9, 11]. Первичная продукция отражает скорость фиксации неорганического углерода фотосинтезирующими организмами, однако дальнейшая судьба образовавшегося органического вещества определяется процессами дыхания, минерализации, переноса и накопления. Долговременное исключение углерода из активного обмена возможно лишь в той мере, в какой часть органического или неорганического углерода выводится из соответствующих пулов и сохраняется в них на заданных временных масштабах.

Не менее важно учитывать роль CH_4, обмен которого с атмосферой определяется совокупностью специфических процессов, определяющих процессы эмиссии, поглощения и трансформации CH_4 [12]. Вследствие этого преобладание поглощения CO_2 в экосистеме над ее эмиссией еще не позволяет однозначно характеризовать экосистему как нетто-поглотитель парниковых

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

газов в более широком смысле. Климатическая функция экосистемы может быть оценена лишь при раздельном анализе потоков отдельных парниковых газов и процессов углеродного цикла с последующей интеграцией результатов в соответствии с конкретной исследовательской задачей и выбранной системой оценки [2, 12].

Такая дифференцированная постановка задачи особенно важна при изучении морских и прибрежных экосистем. В последние десятилетия концепция «голубого углерода» существенно расширила представления о роли ряда прибрежных экосистем в процессах накопления и долговременного хранения углерода [9, 13]. Вместе с тем результаты современных исследований свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности этих процессов и сохраняющихся неопределенностях, связанных с латеральным переносом углерода, соотношением продукции и деструкции органического вещества, а также с ролью CH_4 и других парниковых газов в формировании суммарного климатического эффекта [9, 14].

Таким образом, систематические наблюдения за процессами углеродного цикла и потоками отдельных парниковых газов в морских и прибрежных экосистемах приобретают особое значение. Они необходимы как для понимания функционирования этих экосистем и механизмов их пространственно-временной изменчивости, так и для оценки их отклика на изменение климата и антропогенные воздействия. Получение таких данных формирует научную основу для разработки и обоснования мер, направленных на смягчение последствий изменения климата и адаптацию природных и социально-экономических систем к его воздействию. Именно в этом контексте исследования морских экосистем следует рассматривать как важную составляющую современной климатической повестки.

1. Морские экосистемы в системе климатических решений

В последние годы задачи сокращения антропогенных выбросов парниковых газов и перехода к низкоуглеродному развитию стали важной составляющей международной и национальной климатической повестки [2, 15, 16]. Однако результативность мер по смягчению последствий изменения климата определяется не только масштабом и темпами сокращения выбросов парниковых газов от антропогенных источников. Не менее важным является понимание роли природных экосистем в обмене CO_2 и других парниковых газов, а также в процессах накопления, трансформации и переноса углерода.

В этой связи следует рассматривать два взаимодополняющих направления климатической политики. Первое направление связано с последовательным сокращением антропогенных выбросов парниковых газов. Второе направлено на сохранение и восстановление природных экосистем, а также, в тех случаях, где это имеет достаточное научное обоснование, на поддержание или усиление

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

процессов поглощения атмосферного CO_2 и долговременного накопления углерода. При этом оценка эффективности таких мер должна учитывать возможные потоки CH_4 и других парниковых газов, поскольку их учет является необходимым условием комплексной оценки климатической функции экосистем. Эти направления не являются альтернативными: природные климатические решения не могут заменить сокращение антропогенных выбросов, но способны предложить меры по их снижению в рамках комплексной стратегии смягчения изменения климата.

Для России эта задача имеет особое значение, учитывая разнообразие природных ландшафтов, значительную площадь различных типов экосистем и большую протяженность морских побережий. Российские морские акватории охватывают широкий спектр природных условий – от субтропических районов Черного моря до высокоширотных и арктических морей. Различия в температурном и ледовом режиме, биологической продуктивности, структуре и циркуляции вод, величине речного стока и биоразнообразии прибрежных экосистем обусловливают существенную пространственную и временную изменчивость процессов обмена CO_2 и CH_4, а также процессов переноса, трансформации и накопления углерода.

Следовательно, непосредственный перенос оценок потоков парниковых газов, полученных для отдельных регионов или типов экосистем, на другие регионы с иными природными условиями неизбежно связан с существенной неопределенностью. Формирование надежной системы оценки климатической функции природных экосистем требует длительных и стандартизированных наблюдений, развития современной исследовательской инфраструктуры и обеспечения сопоставимости методов измерений [17, 18]. Необходимым условием является также интеграция прямых наблюдений, автоматизированных измерений, методов дистанционного зондирования и численного моделирования, позволяющая перейти от локальных оценок отдельных процессов к анализу их пространственной и временной изменчивости.

Именно в этом контексте следует рассматривать создание и развитие сети карбоновых полигонов Российской Федерации [15]. Они формируют исследовательскую инфраструктуру, необходимую для получения сопоставимых данных о функционировании различных природных экосистем, количественной оценки потоков парниковых газов и исследования процессов углеродного цикла в широком диапазоне природных условий

2. Карбоновые полигоны как инфраструктура исследований климатической функции экосистем

Создание карбоновых полигонов является одним из ключевых направлений развития современной исследовательской инфраструктуры для изучения потоков парниковых газов и процессов углеродного цикла в

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

природных экосистемах. Их назначение не ограничивается измерением концентраций отдельных компонентов атмосферы или водной среды. Основная их задача заключается в разработке, апробации и применении методов, позволяющих количественно оценивать потоки отдельных парниковых газов, процессы трансформации и переноса углерода, а также факторы, определяющие их пространственную и временную изменчивость [15].

В наиболее общем смысле карбоновые полигоны представляют собой совокупность репрезентативных исследовательских площадок и средств наблюдений, объединенных общей научной и методической задачей. Такая инфраструктура предназначена для изучения потоков парниковых газов, процессов углеродного цикла и механизмов, определяющих функционирование природных экосистем в различных пространственных и временных масштабах. В зависимости от природных условий и исследовательских задач она может включать различные типы экосистем и сочетать прямые, автоматизированные, дистанционные и модельные методы исследований.

Принципиальным условием эффективности подобной инфраструктуры является стандартизация измерений, процедур обработки и представления данных. Только при достаточной сопоставимости наблюдений возможно объединение результатов, полученных на отдельных исследовательских площадках, для формирования региональных и национальных оценок. Опыт развития международных сетей наблюдений за потоками вещества и энергии показывает, что научная значимость долговременных измерений существенно возрастает при использовании согласованных методических подходов и включении отдельных станций в более широкую систему наблюдений.

Для морских карбоновых полигонов эта задача имеет ряд специфических особенностей. В отличие от стационарных наземных площадок, морские экосистемы функционируют в условиях высокой пространственной и временной изменчивости гидрофизических и биогеохимических характеристик. Перемещение водных масс, изменчивость структуры и циркуляции вод, температуры и солености, колебания уровня Мирового океана и процессы перемешивания могут существенно влиять как на направление и интенсивность потоков CO_2 и CH_4, так и на процессы трансформации и переноса углерода. Поэтому исследования морских экосистем требуют организации наблюдений в различных пространственных масштабах – от процессов газообмена на границе «море–атмосфера» и процессов, происходящих в прибрежных и донных сообществах, до региональной циркуляции и пространственной структуры характеристик морской среды.

В этих условиях особое значение приобретает интеграция *in situ* измерений, данных дистанционного зондирования и численного моделирования. Спутниковые наблюдения позволяют характеризовать пространственную изменчивость ряда параметров морской среды, включая температуру

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

поверхности моря, концентрацию хлорофилла-а и другие оптически различимые характеристики. Прямые измерения необходимы как для верификации и калибровки дистанционных оценок, так и для изучения процессов, которые не могут быть надежно восстановлены только на основе спутниковой информации. Численное моделирование, в свою очередь, создает возможность интегрировать разнородные наблюдения и переходить от локальных измерений к анализу пространственно-временной организации исследуемых процессов [19].

Таким образом, современные морские карбоновые полигоны целесообразно рассматривать не как отдельные измерительные площадки, а как интегрированную исследовательскую систему, объединяющую наблюдения за физическими, биологическими и биогеохимическими процессами в морских и прибрежных экосистемах. Такой подход позволяет перейти от регистрации отдельных параметров к выявлению механизмов, определяющих изменчивость потоков CO_2 и CH_4, биологической продукции, трансформации, переноса и накопления органического углерода.

Именно понимание этих механизмов определяет возможность использования результатов наблюдений за пределами отдельных исследовательских площадок – для оценки климатически значимых изменений природных систем, анализа связанных с ними рисков, разработки мер адаптации и научного обоснования природоохранных и климатических решений.

В настоящее время в России функционирует три карбоновых полигона, в состав которых входит морские исследовательские площадки. На Черном море функционирует полигон «Геленджик», в акватории Охотского моря - «Карбон-Сахалин» и в Балтийском море - полигон «Росянка». Результаты исследований, проводимые на этих полигонах, уже нашли отражение в ведущих отечественных и зарубежных изданиях. На полигоне «Карбон-Сахалин» проводятся исследования гидрофизических и гидрохимических условий [20, 21], а также выполнены оценки динамики концентрации растворенного кислорода в заливе Анива на основе гидроэкологической CNPSi-модели [22]. На полигоне «Геленджик» получены оценки внутригодовой изменчивости потока CO_2 в северо-восточной части Чёрного моря [23], исследована пространственная и временная изменчивость потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы, а также оценено влияние растительного опада и структуры растительного покрова на эти потоки [24]. На полигоне «Росянка» выполнены исследования фотосинтетической активности фитопланктона в юго-восточной части Балтийского моря [25]. В отдельных работах [26, 27] рассматривалась временная и пространственная изменчивость потоков CO_2 и CH_4 на торфянике полигона «Росянка», а также возможности применения методов колебательной спектроскопии для определения концентраций парниковых газов [28].

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

3. От наблюдения отдельных параметров к интегральному пониманию углеродного цикла в морских и прибрежных экосистемах

Настоящий специальный выпуск посвящен исследованиям, которые отражают различные уровни организации морской климатической и биогеохимической системы. Представленные работы не образуют единую серию измерений одного и того же процесса. Напротив, их объединяет исследование взаимосвязанных компонентов, необходимых для формирования целостного представления о функционировании морских и прибрежных экосистем в контексте углеродного цикла и климатических изменений.

Логика выпуска развивается от изучения физических и биологических факторов, определяющих состояние морской среды, к непосредственным исследованиям продукционных процессов и газообмена, а затем – к более широким пространственным оценкам потоков CO_2 и CH_4.

Первый тематический блок выпуска посвящен Охотскому морю и заливу Анива. Работа Д. В. Зарубиной и соавторов рассматривает пространственно-временную изменчивость концентрации хлорофилла-а в прибрежной полынье у юго-восточного побережья острова Сахалин. На основе анализа длительных рядов наблюдений авторы исследуют межгодовую и сезонную изменчивость площади полыньи и концентрации хлорофилла-а, а также оценивают их взаимосвязь. Работа представляет интерес прежде всего, как пример анализа изменчивости биологической продуктивности в условиях ледового режима, где сезонная структура открытой воды и тонкого льда может определять условия развития фитопланктона. При этом отсутствие устойчивой синхронной связи между площадью полыньи и концентрацией Хлорофилла-А подчеркивает сложность механизмов, связывающих физическую структуру среды и биологический отклик.

Следующая работа, выполненная В. А. Романюком и соавторами, развивает это направление, сопоставляя сезонную и межгодовую изменчивость атмосферного CO_2, концентрации хлорофилла-а и температуры поверхности моря в заливе Анива и в акватории Охотского моря. Авторы используют спутниковые данные, реанализ и наземные наблюдения за период 2003–2020 гг. Особого внимания заслуживает методологический результат исследования: после удаления линейного тренда и сезонного цикла межрайонная разность содержания атмосферного CO_2 оказалась связанной прежде всего с разностью температуры поверхности моря, тогда как устойчивая связь с хлорофиллом-а практически отсутствует. Авторы интерпретируют полученный результат как свидетельство важной роли общего атмосферного переноса, а не прямого проявления локального морского газообмена. Этот вывод особенно важен в контексте корректной интерпретации атмосферных концентраций CO_2: наблюдаемая концентрация в атмосфере не может автоматически

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

рассматриваться как прямой индикатор локального потока CO_2 на границе «море – атмосфера».

Физическая основа функционирования прибрежной экосистемы рассматривается в работе С. А. Мысленкова и соавторов, посвященной уровню моря и скорости течений в заливе Анива. На основе данных заякоренных станций и результатов моделирования исследуются характеристики приливной и инерционной изменчивости уровня моря и течений. Хорошая согласованность модельных и инструментальных данных демонстрирует возможности численного моделирования для пространственной интерпретации наблюдений. Для исследований морского углеродного цикла подобные результаты имеют фундаментальное значение, поскольку гидродинамические процессы определяют перенос растворенных и взвешенных веществ, вертикальное перемешивание и пространственную неоднородность биогеохимических характеристик.

Следующий блок работ переносит внимание к процессам биологической продукции и трансформации органического вещества.

В исследовании С. А. Мошарова и соавторов представлены сезонные оценки первичной продукции в северо-восточной части Черного моря на Геленджикском карбоновом полигоне. Работа основана на сочетании классического радиоуглеродного и современного флуоресцентного методов, что позволило получить оценки сезонной изменчивости первичной продукции в течение 2025 года с высоким временным разрешением. Одновременно анализируется роль доминирующих таксономических групп фитопланктона в формировании первичной продукции. Данная работа занимает важное место в структуре выпуска, поскольку первичная продукция является исходным звеном биологической фиксации неорганического углерода и, следовательно, одним из фундаментальных процессов, определяющих дальнейшую судьбу углерода в морской экосистеме. Вместе с тем результаты исследования следует интерпретировать именно как характеристику первичной продукции, не отождествляя ее непосредственно с чистым атмосферным поглощением CO_2 или долгосрочной секвестрацией углерода.

Продолжением этого направления является работа И. В. Никулиной и соавторов, посвященная сезонной изменчивости накопления макрофитов в прибрежной зоне залива Анива. Использование фотоловушек, наземной фотофиксации и методов семантической сегментации позволило количественно оценить пространственно-временную изменчивость штормовых выбросов макрофитов. Особое значение имеет рассмотрение сезонной динамики характеристик органического материала и связанного с ней эмиссионного потенциала CO_2. Исследование показывает, что для оценки углеродного обмена прибрежной зоны необходимо учитывать не только процессы фиксации

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

углерода в живой биомассе, но и последующую трансформацию и деструкцию органического вещества после его перемещения и накопления на литорали.

Непосредственно к измерению потоков парниковых газов обращается исследование М. В. Кочкиной и соавторов, выполненное на береговом участке карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа. Авторы анализируют сезонную и пространственную изменчивость почвенных потоков CO_2 и CH_4 в лесных и открытых сообществах, учитывая влияние структуры растительного покрова, микрорельефа и микроклиматических условий. Полученные результаты показывают, что на протяжении последних лет почвы исследованных прибрежных экосистем функционировали как источник CO_2 и одновременно как поглотитель атмосферного CH_4. Такая комбинация разнонаправленных потоков еще раз подчеркивает необходимость раздельного анализа потоков отдельных парниковых газов. Экосистема или ее отдельные компоненты могут иметь противоположное направление нетто обмена для CO_2 и CH_4, и оценка ее климатической функции требует учета обоих процессов без терминологического смешения «углеродного потока» и «потока парникового газа».

Завершает содержательную последовательность выпуска работа С. А. Мысленкова и соавторов, посвященная анализу сезонной и межгодовой изменчивости потоков CO_2 и CH_4 на территории России по данным спутниковых наблюдений за период 2003–2026 гг. Исследование расширяет масштаб рассмотрения процессов, представленных в предыдущих статьях выпуска, и переводит анализ от отдельных экосистем и исследовательских полигонов к осредненной для России картине изменчивости потоков двух основных парниковых газов. Рассмотрение среднемесячных характеристик и межгодовой изменчивости потоков CO_2 и CH_4 позволяет выявить сезонные закономерности и многолетние тренды на территории Российской Федерации. Особое значение этой работы для общей структуры выпуска заключается в возможности соотнести результаты локальных наблюдений с более широким пространственным контекстом. При этом интерпретация получаемых оценок требует раздельного рассмотрения потоков CO_2 и CH_4 как самостоятельных показателей, отражающих различные физические и биогеохимические процессы и характеризующихся собственной пространственно-временной изменчивостью. В совокупности с исследованиями, представленными в других статьях выпуска, работа демонстрирует значение многоуровневого подхода, объединяющего наблюдения от отдельных исследовательских площадок и акваторий до анализа процессов в масштабах всей территории страны.

4. Значение междисциплинарного подхода

Совокупность представленных исследований показывает, что формирование научной основы для оценки климатической роли морских

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

экосистем невозможно в рамках одной дисциплины или одного метода наблюдений.

Первичная продукция фитопланктона, концентрация Хлорофилла-А, накопление и деструкция макрофитов, почвенный газообмен прибрежных экосистем, температура поверхности моря, уровень моря, течения, ледовые условия, атмосферный перенос и спутниковые оценки потоков CO_2 и CH_4 относятся к различным уровням организации природной системы. Однако именно их совместное рассмотрение позволяет постепенно перейти от описания отдельных параметров к пониманию процессов, формирующих региональный углеродный цикл.

Для морских карбоновых полигонов особенно перспективным представляется развитие исследований по нескольким взаимодополняющим направлениям.

Во-первых, необходимы длительные непрерывные ряды наблюдений, позволяющие отделить сезонную изменчивость от межгодовых тенденций и экстремальных событий. Кратковременные измерительные кампании могут дать важную информацию о состоянии системы, но не всегда позволяют определить характерные диапазоны природной изменчивости.

Во-вторых, требуется развитие пространственно-распределенной системы мониторинга. Морские и прибрежные экосистемы характеризуются высокой неоднородностью, и результаты, полученные в одной точке, далеко не всегда могут быть перенесены на всю акваторию.

В-третьих, принципиально важна интеграция наблюдений разных масштабов: локальных измерений, автоматизированного мониторинга, дистанционного зондирования и численного моделирования.

В-четвертых, необходимо дальнейшее развитие методических подходов к совместному, но не смешанному анализу потоков различных парниковых газов. В частности, для корректной оценки климатической роли экосистем важно отдельно определять:

- потоки CO_2 и CH_4 через соответствующую границу раздела сред;
- первичную продукцию и другие показатели накопления органического вещества;
- дыхание и минерализацию органического вещества;
- перенос органического и неорганического углерода;
- накопление и долговременное захоронение углерода.

Только после такого раздельного описания процессов возможен переход к интегральным показателям климатического воздействия или климатической эффективности экосистемы.

Наконец, особого внимания заслуживает проблема сопоставимости результатов различных исследований. Морские карбоновые полигоны могут стать основой не только для накопления данных, но и для развития единых

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

методических подходов, калибровки и валидации измерительных систем, а также подготовки специалистов в области мониторинга углеродного цикла и потоков парниковых газов.

5. От научных наблюдений к климатически ориентированному управлению

Исследования на карбоновых полигонах имеют большое значение, далеко выходящее за пределы фундаментальной биогеохимии. Надежные данные о пространственно-временной изменчивости природных потоков CO_2 и CH_4 необходимы для развития национальных систем климатического мониторинга, совершенствования моделей углеродного цикла и более обоснованной оценки роли природных экосистем в условиях изменения климата.

Одновременно такие исследования создают основу для разработки адаптационных решений. Изменение температуры воды, ледового режима, гидродинамики, продуктивности и структуры прибрежных экосистем может приводить к изменению направленности и интенсивности биогеохимических процессов. Следовательно, мониторинг углеродного цикла является одновременно и инструментом наблюдения за реакцией экосистем на климатические изменения.

В более широком контексте результаты исследований природных систем необходимы для поиска оптимального сочетания технологических и природных мер смягчения последствий изменения климата. Стратегия низкоуглеродного развития предполагает сокращение антропогенных выбросов, повышение энергоэффективности и развитие низкоуглеродных технологий. Однако эффективность природных климатических решений также должна оцениваться на основе прямых наблюдений, а не только расчетных коэффициентов или экстраполяций.

Для морских экосистем это особенно важно. Их потенциальная способность участвовать в поглощении атмосферного CO_2 и накоплении углерода не отменяет необходимости учитывать возможные выбросы других парниковых газов, обратные связи с изменением температуры и гидродинамики, а также влияние антропогенной трансформации прибрежной зоны. Поэтому развитие морских карбоновых полигонов должно быть направлено не на поиск упрощенного ответа на вопрос, является ли та или иная акватория «поглотителем углерода», а на построение количественно обоснованной картины функционирования природных экосистем.

Заключение

Настоящий специальный выпуск отражает важный этап становления исследований на морских карбоновых полигонах России. Представленные работы охватывают различные регионы и различные уровни организации

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

природных процессов – от сезонной динамики Хлорофилла-А и первичной продукции до гидродинамики, трансформации макрофитов, почвенных потоков CO_2 и CH_4 и спутниковых оценок пространственной изменчивости потоков парниковых газов.

Их объединяет общий научный вопрос: каким образом физические, биологические и биогеохимические процессы определяют климатическую функцию морских и прибрежных экосистем и каким образом эта функция изменяется во времени и пространстве.

Ответ на этот вопрос невозможен без развития системы долговременных наблюдений и без интеграции методов разных научных дисциплин. Морские карбоновые полигоны создают необходимую инфраструктурную и методологическую основу для такой интеграции. Они позволяют объединить исследования атмосферы, океана, биоты, почв и прибрежных экосистем, связать локальные измерения с дистанционными наблюдениями и моделированием и постепенно сформировать более надежные количественные оценки регионального углеродного цикла и потоков парниковых газов.

Специальный выпуск «Исследования на морских карбоновых полигонах России» показывает, что формирование современной системы морских климатических исследований требует перехода от разрозненных измерений к комплексному наблюдению за взаимосвязанными компонентами природной системы. В этом состоит его основная научная ценность: представленные исследования не только расширяют знания об отдельных процессах в Черном и Охотском морях и на прилегающих территориях, но и формируют методологическую основу для дальнейшего развития сети морских карбоновых полигонов, стандартизации наблюдений и интеграции получаемых данных в задачи климатического мониторинга, адаптации к изменению климата и научного обеспечения низкоуглеродного развития.

Литература

1. Forster P. M., Smith C. J., Walsh T., Lamb W. F., Lamboll R., Hauser M., et al. 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. 15. P. 2295–2327.
2. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2023.
3. Ольчев А.В. Оценка эмиссии и поглощения диоксида углерода и метана поверхностью суши и океана в 21 веке // Фундаментальная и прикладная климатология. 2025. Т. 11. № 3. С. 374–438.
4. Lawrence D. M., Fisher R. A., Koven C. D.et al. The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. Vol. 11. No. 12. P. 4245–4287.

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

5. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change edited by Masson-Delmotte, V. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157896.
6. Gruber N., Bakker D. C. E., DeVries T., et al. Trends and variability in the ocean carbon sink // Nature Reviews Earth & Environment. 2023. Vol. 4. P. 119–134.
7. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., et al. Global Carbon Budget 2025 // Earth System Science Data. 2026. No. 18. P. 3211–3288.
8. DeVries T., Yamamoto K., Wanninkhof R. et al. Magnitude, trends, and variability of the global ocean carbon sink from 1985 to 2018 // Global Biogeochemical Cycles. 2023. No. 37, e2023GB007780.
9. Macreadie P. I., Anton A., Raven J. A., et al. The future of Blue Carbon science // Nature Communications. 2019. Vol. 10. 3998.
10. Laruelle G. G., Cai WJ., Hu X. et al. Continental shelves as a variable but increasing global sink for atmospheric carbon dioxide // Nature Communications. 2018. Vol. 9, 454.
11. Smeaton C., Cui X., Bianchi T. S., Cage A. G., Howe, J. A., & Austin, W. E. The evolution of a coastal carbon store over the last millennium // Quaternary Science Reviews. 2021. No. 266. 107081.
12. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // Earth System Science Data. 2020. No. 12. P. 1561–1623.
13. Macreadie P. I., Costa M. D. P., Atwood T. B. et al. Blue carbon as a natural climate solution // Nature Reviews Earth & Environment. 2021. Vol. 2. P. 826–839.
14. Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 225–230.
15. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Под редакцией С.К. Гулева и А.В. Ольчева – Москва: Научный мир, 2025. 420 с.
16. Seddon N., Chausson A., Berry P., Girardin C. A., Smith A., Turner B. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2020. Vol. 375(1794). 20190120.
17. Baldocchi D., Falge E., Gu L. et al. 2001 FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities // Bulletin of the American Meteorological society. 2001. Vol. 82. No. 11. P. 2415-2434.
18. Papale D. Ideas and perspectives: enhancing the impact of the FLUXNET network of eddy covariance sites // Biogeosciences. 2020. Vol. 17(22). P. 5587–5598.
19. Bauer J., Cai WJ., Raymond P. et al. The changing carbon cycle of the coastal ocean // Nature. 2013. Vol. 504. No. 7478. P. 61–70.
20. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site ‘Carbon-Sakhalin’ (Aniva bay, sea of Okhotsk) // Sustainability. 2024. Vol. 16. no. 7. 3031.
21. Myslenkov S., Pishchalnik V., Arkhipkin V., Romanyuk V., Chastikov V., Latkovskaya, E. Physical oceanography of Aniva bay (Sea of Okhotsk) // Pure and Applied Geophysics. 2026. Vol. 183. P. 3821–3848.

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

22. Леонов А. В., Архипкин В. С., Пищальник В. М., Латковская Е. М. Моделирование динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива (Охотское море) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. № 6. С. 77–85.
23. Полухин А. А., Мурзакова Ю. В., Пронина Ю. О. и др. Годовая изменчивость потока CO_2 на карбоновом полигоне в северо-восточной части Чёрного моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2026. Т. 526. № 2. С. 408–418.
24. Кочкина М. В., Карпунина Д. А., Леонова Д. С. и др. Сезонная и суточная изменчивость потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края // Юг России: экология, развитие. 2026. Т. 21. № 2(79). С. 114–124.
25. Боровкова К. А., Мошаров С. А., Баширова Л. Д., Малышева А. С. Сезонная и пространственная изменчивость фотосинтетической активности фитопланктона в юго-восточной части Балтийского моря // Океанология. 2026. Т. 66. № 2. С. 279–290.
26. Napreenko M., Dyukarev E., Kileso A. et al. Methane emission heterogeneity and its temporal variability on an abandoned milled peatland in the Baltic region of Russia // Land. 2025. Vol. 14. No. 9. P. 1840
27. Napreenko M., Kileso A., Napreenko-Dorokhova T. et al. Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. Vol. 22.P. 11267–11274.
28. Зюбин А. Ю., Опарин Я. С., Князьков И. Д. и др. Возможности применения методов колебательной спектроскопии для определения парниковых газов на карбоновом полигоне «Росянка» (Калининградская область) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26. № 4. С. 695–704.

References

1. Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., et al. (2023). 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*, 15, 2295–2327.
2. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2023.
3. Ol'chev A.V. (2025). Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. *Fundamental'naya I prikladnaya klimatologiya*, 11, 3, 374–438(in Russ.).
4. Lawrence, D. M., Fisher, R. A., Koven, C. D.et al. (2019). The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 12, 4245–4287.
5. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change edited by Masson-Delmotte, V. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157896.
6. Gruber, N., Bakker, D. C. E., DeVries, T., et al. (2023) Trends and variability in the ocean carbon sink. *Nature Reviews Earth &Environment*, 4, 119–134.

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

7. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., et al. (2026) Global Carbon Budget 2025. *Earth System Science Data*, 18, 3211–3288.
8. De Vries, T., Yamamoto, K., Wanninkhof, R. et al. (2023). Magnitude, trends, and variability of the global ocean carbon sink from 1985 to 2018. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007780.
9. Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., et al. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 10, 3998.
10. Laruelle, G.G., Cai, WJ., Hu, X. et al. (2018). Continental shelves as a variable but increasing global sink for atmospheric carbon dioxide. *Nature Communications*, 9, 454.
11. Smeaton, C., Cui, X., Bianchi, T. S., Cage, A. G., Howe, J. A., Austin, W. E. (2021). The evolution of a coastal carbon store over the last millennium. *Quaternary Science Reviews*, 266, 107081.
12. Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B.et al. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12, 1561–1623.
13. Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B. et al. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 826–839.
14. Rosentreter, J.A., Borges, A.V., Deemer, B.R. et al. (2021). Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 14, 4, 225–230.
15. Karbonovye poligony: monitoring, geoinformacionnye sistemy, sekvestracionnye tekhnologii. Pod redakciej S.K. Gulevai A.V. Ol'cheva – Moskva: Nauchnyj mir, 2025. 420 s. (in Russ.).
16. Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A., Smith, A., Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190120.
17. Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L.et. al. (2001). 2001 FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological society*, 82, 11, 2415–2434.
18. Papale, D. (2020). Ideas and perspectives: enhancing the impact of the FLUXNET network of eddy covariance sites. *Biogeosciences*, 17(22), 5587–5598.
19. Bauer, J., Cai, WJ., Raymond, P. et al. (2013). The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504, 7478, 61–70.
20. Pishchalnik, V., Myslenkov, S., Latkovskaya, E., Arkhipkin, V. (2024). Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site ‘Carbon-Sakhalin’ (Aniva bay, sea of Okhotsk). *Sustainability*, 16, 7, 3031
21. Myslenkov, S., Pishchalnik, V., Arkhipkin, V., Romanyuk, V., Chastikov, V., Latkovskaya, E. (2026). Physical oceanography of Aniva bay (Sea of Okhotsk). *Pure and Applied Geophysics*, 183, 3821–3848.
22. Leonov, A. V., Arhipkin, V. S., Pishchal'nik, V. M., Latkovskaya, E. M. (2023). Modeling the dynamics of dissolved oxygen concentration in waters of the Aniva bay (the sea of Okhotsk). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 78, 6, 77–85 (in Russ.).
23. Poluhin, A. A., Murzakova, YU. V., Pronina, YU. O. et al. (2026). Annual Variability of CO_2 Flux at the Carbon Polygon in the Northeastern Black Sea. *Doklady Rossijsko j akademii nauk. Nauki o Zemle*, 526, 2, 408–418 (in Russ.).

© Olchev A.V., & Myslenkov S.A., 2026

24. Kochkina, M. V., Karpunina, D. A., Leonova, D. S. et al. (2026). Seasonal and daily variability of CO_2 and CH_4 fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 21, 2(79), 114–124 (in Russ.).
25. Borovkova, K. A., Mosharov, S. A., Bashirova, L. D., Malysheva, A. S. (2026). Seasonal and spatial variability of phytoplankton photosynthetic activity in the southeastern part of the Baltic sea. *Okeanologiya*, 66, 2, 279–290 (in Russ.).
26. Napreenko, M., Dyukarev, E., Kileso, A. et al. (2025). Methane Emission Heterogeneity and Its Temporal Variability on an Abandoned Milled Peatland in the Baltic Region of Russia. *Land*, 14, 9, 1840.
27. Napreenko, M., Kileso, A., Napreenko-Dorokhova, T. et al. (2025). Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 11267–11274.
28. Zyubin, A. YU., Oparin, YA. S., Knyaz'kov, I. D. et al. (2026). A feasibility study of vibrational spectroscopy methods for greenhouse gas detection at the “Rossyanka” Carbon Measurement Supersite Kaliningrad Oblast, Russia). *Nauchno-tekhnicheskij vestnik infor macionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 26, 4, 695–704(in Russ.).

© Ольчев А.В., Мысленков С.А., 2026

УДК 547.979.7
DOI: 10.7868/S2658670326030029

К вопросу об оценке пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а в прибрежной полынье Охотского моря

Зарубина Дарья Васильевна
ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Шумилов Илья Валерьевич
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

Латковская Елена Максимовна
ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Пищальник Владимир Михайлович
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Романюк Валерий Анатольевич
ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Никулина Ирина Владимировна
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа динамики концентрации хлорофилла-а в зоне полыньи, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин (Охотское море). На основе коллекции векторных карт были рассчитаны ежедневные значения площади акватории, занятой тонким льдом и открытой водой, за 2016–2025 гг. Площадь полыньи характеризуется выраженной межгодовой и внутрисезонной изменчивостью, наиболее заметной в период ее максимального развития в марте. Максимальная площадь полыньи отмечена в

© Zarubina D.V. et al., 2026

2017 г., минимальная – в 2018 г. Анализ концентрации хлорофилла-а за 1998–2024 гг. выявил выраженную внутригодовую изменчивость с основным максимумом в апреле–июне и вторичным повышением в октябре–ноябре. Межгодовая динамика хлорофилла-а характеризуется положительной тенденцией (~ 0,01 мг/м³ в год); наиболее высокие среднегодовые значения отмечены в 2020–2024 гг. Совместный анализ площади полыньи и концентрации хлорофилла-а проводился за 2016–2024 гг. Статистически значимая синхронная связь не была установлена. Максимальный коэффициент Спирмена составил 0,47 и отмечался при временном лаге +3 месяца.

Ключевые слова: хлорофилл-а, полынья, ледяной покров, Охотское море

Благодарности. Исследование выполнялось и финансировалось в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM 2024–0002) и государственного задания Сахалинского государственного университета (FEFF–2024–0004) «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий».

Для цитирования: Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Латковская Е.М., Пищальник В.М., Романюк В.А., Никулина И.В. К вопросу об оценке пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а в прибрежной полынье Охотского моря // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 23–36. DOI: 10.7868/S2658670326030029

Дата поступления в редакцию: 10.08.2026
Дата принятия к публикации: 15.09.2026

UDC 547.979.7
DOI: 10.7868/S2658670326030029

Spatiotemporal Variability of Chlorophyll-a Concentration in the Coastal Polynyas of the Sea of Okhotsk

Daria V. Zarubina
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Ilya V. Shumilov
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

© Зарубина Д.В. и др., 2026

Elena M. Latkovskaya
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Vladimir M. Pishchalnik
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Valery A. Romanyuk
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Irina V. Nikulina
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Abstract. This study presents the results of an analysis of chlorophyll-a concentration dynamics within the polynya zone adjacent to the south-eastern coast of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk). Based on a collection of vector maps, daily areas of thin ice and open water were calculated for the period 2016–2025. The polynya area is characterised by pronounced interannual and seasonal variability, which is most notable during its maximum development in March. The maximum polynya area was observed in 2017, whilst the minimum occurred in 2018. An analysis of chlorophyll-a concentration for 1998–2024 revealed a distinct intra-annual variability, featuring a primary maximum between April and June and a secondary autumn increase during October and November. The interannual dynamics of chlorophyll-a are characterised by a positive trend (~ 0,01 mg/m³ per year), with the highest annual mean values recorded in 2020–2024. A joint analysis of the polynya area and chlorophyll-a concentration was conducted for the 2016–2024 period. No statistically significant synchronous relationship was established. The highest Spearman rank correlation coefficient 0.47 was observed at a +3-month lag.

Keywords: chlorophyll-a, coastal polynya, ice cover, sea of Okhotsk

Acknowledgments. The study was carried out and financed within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002) and the state assignment of Sakhalin State University (FEFF-2024-0004) "Creation of scientific foundations for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpho-lithosystems of coastal-marine wetlands and adjacent marine areas".

© Zarubina D.V. et al., 2026

For citation: Zarubina D.V., Shumilov I.V., Latkovskaya E.M., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Nikulina, I.V. (2026). On the issue of assessing the spatiotemporal variability of chlorophyll-a concentration in the coastal polynya of the Sea of Okhotsk. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 23–36. doi: 10.7868/S2658670326030029 (in Russ.).

Received: 10.08.2026
Accepted: 15.09.2026

Введение

Юго-восточное побережье о. Сахалин омывается водами Охотского моря, являющегося одним из наиболее продуктивных морей России. Информативным показателем биологической продуктивности морской среды является концентрация хлорофилла-а – основного фотосинтетического пигмента фитопланктона. Изменения содержания хлорофилла-а позволяют оценивать сезонные особенности развития фитопланктонных сообществ, выявлять периоды максимальной биологической активности и анализировать реакцию морских экосистем на изменения внешних природных факторов [1]. Интеграция данных о пространственно-временной изменчивости хлорофилла-а в модели углеродного цикла представляет возможность численно оценить вклад конкретных акваторий в секвестрацию парниковых газов, что является приоритетной задачей национальной системы климатического мониторинга в рамках пилотного проекта «Карбоновые полигоны Российской Федерации».

Средняя продолжительность ледового периода в районе исследований – 170 дней [2]. Продолжительность ледового сезона определяет период и интенсивность фотосинтетически активной радиации, сроки начала весенней вегетации водорослей и, в конечном итоге, объём годовой продукции экосистемы [3]. Особенностью ледовых условий в Охотском море является формирование стационарных полыней вдоль его северного и северо-западного побережья под воздействием зимнего муссона. Полыньи [4] могут быть заполнены ледяной кашей или покрыты начальными видами льда, ниласом или молодым льдом. При воздействии ветров восточных румбов на любой фазе развития ледяного покрова наблюдается частичное или полное закрытие полыньи [5]. Площадь полыньи подвержена существенной внутрисезонной и межгодовой изменчивости [6]. Увеличение освещенности в период развития полыньи интенсифицирует цветение фитопланктона, продукция которого служит основой для питания следующих звеньев пищевой цепи [7–9]. Целью настоящего исследования является оценка пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а в прибрежной полынье, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин, и ее связи с площадью полыньи при прямых и лаговых сопоставлениях.

© Зарубина Д.В. и др., 2026

1. Материалы и методы исследования

Для анализа ледяного покрова использовались ежедневные спутниковые данные объединенного продукта толщины тонкого морского льда SMOS–SMAP за 2016–2025 гг., предоставляемые Университетом Бремена в формате NetCDF. Данные представлены на сетке с шагом 12,5 км [10], тогда как фактическое пространственное разрешение радиометрических измерений составляет около 40 км. Первичные измерения выполняются микроволновыми радиометрами L-диапазона на борту космических аппаратов миссий SMOS (Soil Moistureand Ocean Salinity) [11] и SMAP (Soil Moisture Active Passive) [12]. В прибрежной зоне оценки площади могут быть подвержены влиянию суши и смешению сигналов воды и льда внутри элемента разрешения. Обработка данных выполнялась с помощью программы «NetCDF Processing» [13], последующий анализ ледовых характеристик - с применением программного комплекса «Ice Data Processing» [14]. Для визуализации и пространственного анализа использовались скрипты на языке Python [15] и геоинформационная система QGIS [16].

Для анализа пространственно-временной изменчивости полыней на юго-восточном побережье о. Сахалин исследуемый район был ограничен координатами 46°–50° с.ш., от 147° в.д. – до береговой линии острова (рис. 1). Поэтапный анализ спутниковых данных производился в период с января по апрель, когда формирование полыней наиболее вероятно. Полынья выделялась как прибрежная область открытой воды или тонкого льда толщиной не более 10 см, пространственно не имеющая непосредственной связи с открытой акваторией моря за внешней кромкой ледяного покрова. При распознавании полыньи допускалось примыкание области к береговой линии о. Сахалин, тогда как связные области тонкого льда, пересекающие внешние границы расчётной акватории и для которых невозможно подтвердить их отделённость от открытой части моря, из дальнейшего анализа исключались. Согласно номенклатуре ВМО, диапазон толщин льда до 10 см соответствует начальным формам морского льда, включая нилас [4]. Таким образом, выбранный порог позволяет выделять участки открытой воды и наиболее тонкого льда, характерные для полыньи, отделяя их от ледяного покрова других возрастов. Дополнительным критерием является высокая чувствительность радиометрических измерений L-диапазона к изменению толщины именно тонкого морского льда [10, 17]. На первом этапе по данным дистанционного зондирования были построены растровые карты, соответствующие выбранному критерию. Визуальный анализ этих карт подтвердил регулярное наличие полыней в исследуемом районе. На втором этапе для количественного анализа была создана векторная модель: зоны льда толщиной до 10 см в границах исследуемой акватории преобразовывались в

© Zarubina D.V. et al., 2026

полигоны с последующей фильтрацией по заданным критериям, что позволило оценивать их площадь и динамику [6].

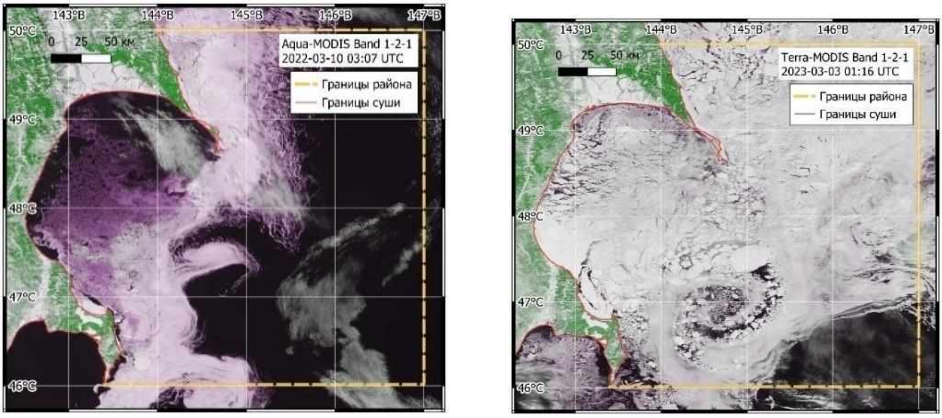


Рис. 1. *Полынья на юго-восточном побережье о. Сахалин на фазе открытия по данным спутникового снимка Aqua-MODIS, 10.03.2022 (слева) и полынья на фазе закрытия в пределах исследуемого района по данным спутникового снимка Terra-MODIS, 03.03.2023 (справа)* [6]

Для оценки концентрации хлорофилла-а в границах исследуемого района (рис. 1) использовались данные архива C3S Ocean Colour Chlorophyll-a [18], полученные по спутниковым измерениям SeaWiFS, Aqua MODIS, Envisat MERIS, Suomi-NPP VIIRS и Sentinel-3 OLCI. Суточные данные за 1998–2024 гг. представлены на сетке с шагом около 4 км. Концентрация хлорофилла-а (мг/м³) оценивалась с помощью алгоритмов смешивания [19]. В исходном продукте значения доступны только для свободных от облачности и льда пикселей, поэтому пространственная обеспеченность данными могла различаться между месяцами. Среднесуточные значения рассчитывались с помощью программы «NetCDF Processing» [13].

Совместный анализ площади полыньи и концентрации хлорофилла-а проводился за 2016–2024 гг. Ледовые характеристики учитывались за январь–апрель; при лаговых сопоставлениях ряд концентрации хлорофилла-а сдвигался относительно ряда площади полыньи. Положительный лаг означает, что изменения концентрации хлорофилла-а рассматривались спустя соответствующее число месяцев после изменения площади полыньи.

Для вычисления среднемесячных значений концентрации хлорофилла-а в пределах полыней исследуемой акватории были сформированы матричные

© Зарубина Д.В. и др., 2026

структуры данных, содержащие сведения о количестве дней в месяце, удовлетворяющих установленным критериям идентификации полыньи. Для перехода от суточных состояний к среднемесячной характеристике использовался критерий внутримесячной повторяемости: ячейка включалась в зону устойчивой полыньи при соблюдении условия толщины льда ≤10 см не менее чем в течение 15 суток месяца. Что позволило идентифицировать не максимальную площадь кратковременного открытия полыньи, а наиболее устойчивое положение полыньи в течение месяца. Полученная векторная модель использовалась для расчёта среднемесячных концентраций хлорофилла-а в пятне полыньи.

Статистическую связь между площадью полыньи и концентрацией хлорофилла-а оценивали с использованием коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (r_s). Коэффициент Пирсона использовался для оценки линейной связи между исходными количественными значениями показателей. Ранговый коэффициент Спирмена применялся для оценки связи без предположения о её линейном характере и без требования нормальности распределения исходных показателей. Для межгодового анализа использовались средние за январь–апрель значения за 2016–2024 гг. (n = 9), для внутрисезонного анализа – месячные значения (n = 36). Статистическая значимость оценивалась при $\alpha = 0,05$.

2. Результаты исследования и их обсуждение

На основе сформированной коллекции векторных карт были получены временные ряды изменчивости площади полыньи в зоне, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин за 2016–2025 гг. В целом среднемесячные значения площади полыньи в течение сезона остаются относительно невысокими и варьируют в пределах 2,5–6,2 тыс. км². Наибольшая межгодовая изменчивость отмечена в марте, что соответствует фазе максимального развития полыньи. Наиболее высокие и наиболее низкие среднесезонные значения зафиксированы соответственно в 2017 и 2018 гг. [6].

Поскольку формирование и эволюция полыньи способны влиять на условия освещенности, вертикального перемешивания и поступления биогенных элементов в верхний слой моря [20], следующим этапом анализа стало рассмотрение биологического отклика данной акватории, оцениваемого по концентрации хлорофилла-а. Установлена изменчивость содержания хлорофилла-а на межгодовом уровне (рис. 2а). Минимальное среднегодовое значение за рассматриваемый период отмечено в 2000 г. и составило около 0,8 мг/м³. Наиболее высокое среднегодовое значение наблюдалось в 2021 г. – около 1,3 мг/м³. К числу лет с повышенными среднегодовыми концентрациями также относятся 2020, 2022, 2023 и 2024 гг., что указывает на сохранение

© Zarubina D.V. et al., 2026

относительно высокого уровня хлорофилла-а в современный период. Линейная аппроксимация среднегодового ряда показывает выраженную положительную тенденцию. Скорость роста составила приблизительно 0,01 мг/м^3 в год (~0,9% от среднего многолетнего значения), что соответствует увеличению примерно на 0,26 мг/м^3 за период 1998–2024 гг. (~27,6% относительно начального значения линии тренда). Линейный тренд является статистически значимым: коэффициент корреляции r = 0,69 превышает критическое значение 0,38 при n = 27 и уровне значимости α = 0,05. Сравнение отдельных временных интервалов также подтверждает это изменение: средняя концентрация за 1998–2006 гг. составила около 1 мг/м³, за 2007–2015 гг. – 1,02 мг/м³, а за 2016–2024 гг. – 1,15 мг/м³.

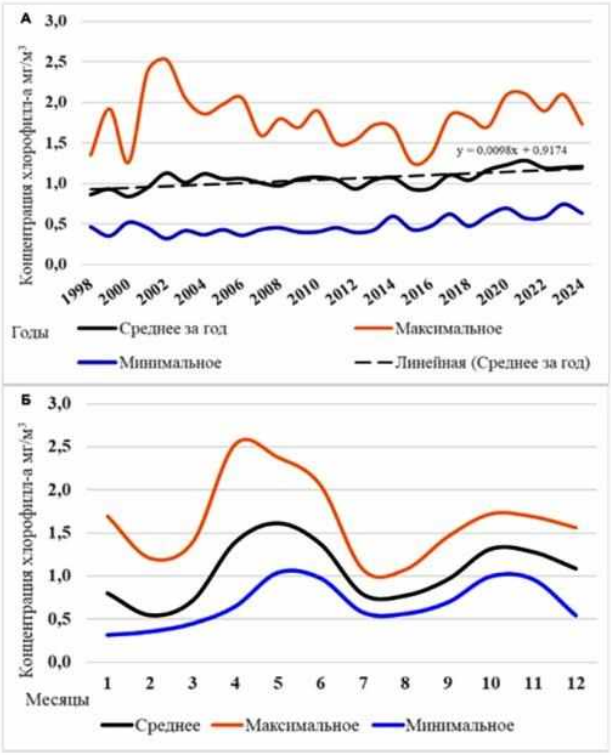


Рис. 2. *Межгодовая и внутрисезонная изменчивость концентрации хлорофилла-а в зоне, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин*

© Зарубина Д.В. и др., 2026

Максимальные месячные значения концентрации хлорофилла-а были связаны преимущественно с весенним периодом (апрель–июнь) (рис. 2б). Абсолютный максимум зафиксирован в апреле 2002 г. и составил 2,5 мг/м³. Высокие значения также отмечены в мае 2001 г. – 2,4 мг/м³, мае 2020 и 2021 гг. и апреле 2023 г. – 2,1 мг/м³. Минимальные значения, напротив, приходились главным образом на январь-февраль: январь 2002 г. – 0,3 мг/м³, январь 1999 г. и февраль 2006 г. – 0,4 мг/м³.

Для всей исследуемой акватории (рис. 1) анализ среднемесячных значений концентрации хлорофилла-а за 1998–2024 гг. выявил выраженную внутригодовую изменчивость. Средняя за весь период концентрация составила около 1 мг/м³ при диапазоне значений от 0,3 до 2,5 мг/м³. Минимальные значения преимущественно отмечались в зимний период, тогда как максимальные концентрации были характерны для весны и начала лета. В пределах зон устойчивой полыньи среднемесячная концентрация хлорофилла-а в январе–апреле 2016–2024 гг. изменялась от 0,7 до 2,5 мг/м³.

Наиболее низкие среднемноголетние концентрации наблюдались в феврале, где среднее значение составило 0,6 мг/м³. В январе и марте концентрации также оставались относительно низкими и составляли соответственно 0,8 и 0,7 мг/м³. Начиная с апреля происходило резкое увеличение содержания хлорофилла-а: среднемноголетнее значение достигало 1,4 мг/м³. Максимум сезонного цикла приходился на май, когда средняя концентрация составляла 1,6 мг/м³. В июне значения оставались повышенными, около 1,4 мг/м³, после чего в июле-августе происходило снижение до 0,8 мг/м³.Во второй половине года выявлен вторичный осенний максимум. В сентябре средняя концентрация возрастала до 0,9 мг/м³, а в октябре и ноябре достигала ~1,3 мг/м³. В декабре наблюдалось снижение до 1 мг/м³. Таким образом, сезонный ход концентрации хлорофилла-а характеризуется двумя фазами повышенных значений: основной весенней и менее выраженной осенней.

Полученные результаты указывают на то, что максимум концентрации хлорофилла-а, приходящийся на апрель-июнь, отражает весеннее развитие фитопланктона после улучшения световых условий и перестройки гидрологической структуры верхнего слоя моря. Содержание хлорофилла-а в морском фитопланктоне служит важной характеристикой оценки первичной биопродуктивности вод: существует закономерная связь между его количеством и величиной продукции фитопланктона. Осеннее повышение концентраций может быть связано с повторным вовлечением биогенных элементов в фотический слой при усилении волнового перемешивания. Межгодовые различия на фоне этой сезонной структуры указывают на изменчивость условий формирования продукционного сезона, при этом в последние годы наблюдается тенденция к повышению среднегодовых концентраций хлорофилла-а.

© Zarubina D.V. et al., 2026

Оценка возможной связи между ледовыми условиями и биологическим откликом проводилась за общий для обоих рядов период 2016–2024 гг. (рис. 3).

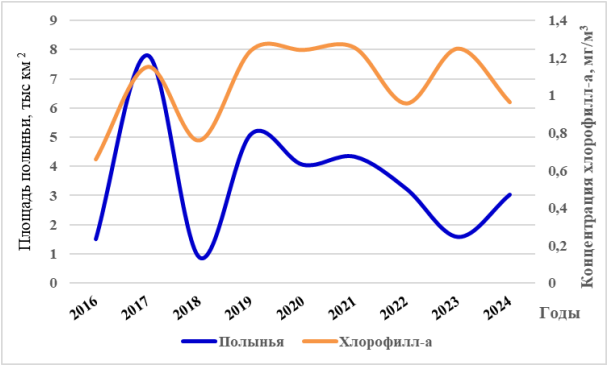


***Рис. 3**. Временной ход средних за январь–апрель значений площади полыньи и концентрации хлорофилла-а в исследуемом районе за 2016–2024 гг.*

В пределах данного периода сопоставлялись месячные значения площади полыньи в зоне, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин, и концентрации хлорофилла-а, при этом учитывались как прямые соответствия, так и возможные временные запаздывания отклика.

При межгодовом анализе статистически значимая связь между площадью полыньи и концентрацией хлорофилла-а не была установлена. Коэффициент корреляции Пирсона между средними за январь–апрель значениями составил r = 0,57 и не превысил критическое значение 0,67 при длине ряда 9 лет.

При месячном анализе наиболее высокий коэффициент корреляции Спирмена выявлен при лаге +3 месяца (r_s = 0,47). Коэффициент корреляции является значимым и превышает критическое значение 0,33 при уровне значимости 0,05, однако не сопровождается последовательным усилением связи на соседних лагах (+1 и +2 месяца). Коэффициент корреляции Пирсона при этом же лаге (r = 0,32) не достигает номинальной значимости. Выявленная ранговая связь рассматривалась как предварительная, а не как статистически устойчивое подтверждение отложенного отклика.

Таким образом, результаты не подтверждают устойчивую прямую годовую зависимость между площадью полыньи и концентрацией хлорофилла-а. Основной статистический сигнал проявляется в отдельных соотношениях (+3 месяца), которые могут отражать отложенный биопродукционный отклик на океанологические условия зимне-весеннего периода. Необходимо отметить, что абсолютные значения концентрации хлорофилла, получаемые по спутниковым

© Зарубина Д.В. и др., 2026

данным, корректно отражают относительные тренды и сезонные изменения, однако их использование в качестве точных количественных показателей для задач мониторинга требует обязательной посткалибровки по синхронным полевым измерениям.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены результаты, характеризующие пространственно-временную динамику ледовых условий и продукционных процессов на юго-восточном побережье о. Сахалин.

1. Установлено, что площадь полыньи в зоне, прилегающей к юго-восточному побережью о. Сахалин, подвержена межгодовой и внутрисезонной изменчивости, наиболее заметной в период ее максимального развития в марте.

2. Анализ сезонного хода концентрации хлорофилла-а выявил две фазы повышенных значений: основную весеннюю с отдельными значениями до 2,5 мг/м³ и менее выраженную осеннюю со среднемесячными значениями до 1,3 мг/м³.

3. Межгодовая динамика содержания хлорофилла-а в исследуемой акватории характеризуется статистически значимым положительным трендом: за период 1998–2024 гг. среднегодовая концентрация возросла примерно на 0,26 мг/м³, или на 27,6% относительно начального значения линии тренда, при средней скорости прироста 0,01 мг/м³ в год.

4. Статистически значимая связь между средними за январь–апрель значениями площади полыньи и концентрации хлорофилла-а не выявлена. Наиболее высокий месячный коэффициент Спирмена отмечен при лаге +3 месяца (r_s = 0,47), однако устойчивость выявленного статистического сигнала требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Андреев А. Г. Межгодовые изменения параметров морской воды в поверхностном и промежуточном слоях Японского моря // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2018. №. 6 (202). С. 5–12.
2. Романюк В. А. Ледовый режим Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха: дис. – Южно-Сахалинск: автореф. дис. канд. геогр. наук, 2019.
3. Никулина И.В., Латковская Е.М., Шумилов И.В., Романюк В.А., Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Губко Е.М. Анализ динамики штормовых выбросов макрофитов на побережье зал. Анива по данным подспутниковых наблюдений // Природные процессы и катастрофы: изучение и адаптация: тезисы докладов VII Молодежной научной конференции–школы, Южно–Сахалинск, 13–16 октября 2025 г. [Электронный ресурс] / ред.: А.А. Верхотуров, О.А. Никитенко, К.А. Швидская – Южно–Сахалинск: Ин–т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2025. – С. 60-61. Режим доступа: http://books.imgg.ru/atlasfull/proc6.pdf.

© Zarubina D.V. et al., 2026

4. Номенклатура ВМО по морскому льду. Терминология. Том 1. WMO/OMM/BMO - No.259 • Издание 1970 – 2019. Электронный ресурс: http://wdc.aari.ru/wmo/docs/for_MMO/WMO-No.259_Vol-I_terminology_2019.docx (дата обращения 13.03.2026).
5. Pishchalnik V., Melkiy V., Pokrashenko S., Galtsev A. Development Of Ice Polynya Near To The North East Coast Of Sakhalin Island. Proceedings of the 21st International Symposium on Okhotsk Sea Sea Ice, 19–24 February 2006, Mombetsu, Hokkaido, Japan. P. 223–224.
6. Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Романюк В. А., Латковская Е.М. Оценка пространственно-временной изменчивости прибрежной полыньи в Охотском море // Интер Карто. Интер ГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ. – 2026.
7. Mei Z., Legendre L., Gratton Y., Tremblay J., LeBlanc B., Klein B., Gosselin M. Phytoplankton production in the North Water Polynya: size-fractions and carbon fluxes, April to July 1998. Marine Ecology Progress Series. 2003. T. 256. P. 13–27.
8. Tremblay J., Smith Jr W. Primary production and nutrient dynamics in polynyas // Elsevier Oceanography Series. 2007. V. 74. P. 239–269
9. Кособокова К. Н. Зоопланктон арктического бассейна (структура сообществ и региональные особенности количественного распределения): дис. на соискание доктора биологических наук. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва. 320 с., 2010.
10. Patilea, C., G. Heygster, M. Huntemann, & G. Spreen. Combined SMAP/SMOS Thin Sea Ice Thickness Retrieval // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 675–691. doi:10.5194/tc-13-675-2019.
11. Официальный сайт SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) Data. Data Collections. Электронный ресурс: https://earth.esa.int/eogateway/missions/smos (дата обращения 13.03.2026)
12. Официальный сайт SMAP (Soil Moisture Active Passive) Data. Products. Электронный ресурс: https://smap.jpl.nasa.gov (дата обращения 13.03.2026)
13. Шумилов И.В., Ващенко Д.А., Романюк В.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024662834. «NetCDF Processing». 2024. № 2024661302 от 20.05.2024; опубл. 30.05.2024.
14. Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. «Ice Data Processing». 2023. № 2023682641 от 30.10.2023; опубл. 25.12.2023.
15. Официальный сайт языка программирования Python. Электронный ресурс: https://www.python.org/ (дата обращения 16.03.2026)
16. Официальный сайт геоинформационной системы QGIS. Электронный ресурс: https://www.qgis.org/ (дата обращения 16.03.2026)
17. Huntemann M., Heygster G., Kaleschke L., Krumpen T., Mäkynen M., Drusch M. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze-up period from SMOS high incident angle observations // The Cryosphere. 2014. No. 8(2). P. 439–451.
18. Веб-портал Copernicus Climate Change Service. Climate Data Store. Datasets/ Электронный ресурс: https://cds.climate.copernicus.eu (дата обращения 13.03.2026)

© Зарубина Д.В. и др., 2026

19. Jackson et al. Ocean colour daily data from 1997 to present derived from satellite observations, Version 6.0. Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS). 2022. https://doi.org/10.24381/cds.f85b319d.
20. Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Латковская Е.М., Пищальник В.М., Романюк В.А., Никулина И.В. «Оазисы» жизни во льдах: динамика концентрации хлорофилла-а в полынье Охотского моря на примере юго-восточного шельфа о. Сахалин // Тимоновские чтения. Материалы II научно-практической конференции, посвященной 55-летию создания океанологического факультета. Санкт-Петербург.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет – 2026 б. С. 33–36.

References

1. Andreev A. G. Interannual changes in seawater parameters in the surface and intermediate layers of the Sea of Japan // Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018. No. 6 (202). P. 5-12. (in Russ.)
2. Romanyuk V. A. Ice regime of the Sea of Okhotsk under the conditions of the global trend of increasing air temperature: diss. – Yuzhno-Sakhalinsk: author's abstract. diss. candidate of geogr. sciences, 2019. (in Russ.)
3. Nikulina I.V., Latkovskaya E.M., Shumilov I.V., Romanyuk V.A., Zarubina D.V., Pishchalnik V.M., Gubko E.M. Analysis of the dynamics of storm emissions of macrophytes on the coast of the Gulf of Aniva Based on Ground-Based Observations / Natural Processes and Disasters: Study and Adaptation: Abstracts of the VII Youth Scientific Conference-School, Yuzhno-Sakhalinsk, October 13–16, 2025 [Electronic Resource] / Ed.: A. A. Verkhoturov, O. A. Nikitenko, K. A. Shvidskaya – Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2025. – 7.20 MB: pp. 60–61 – Access Mode: http://books.imgg.ru/atlasfull/proc6.pdf.(in Russ.)
4. WMO sea ice nomenclature. Terminology – Volume I. WMO/OMM/BMO - No.259 • Edition 1970 – 2019. Electronic resource: http://wdc.aari.ru/wmo/docs/for_MMO/WMO-No.259_Vol-I_terminology_2019.docx (date of access 13.03.2026).
5. Pishchalnik V., Melkiy V., Pokrashenko S., Galtsev A. Development of Ice Polynya Near to the Northeast Coast of Sakhalin Island. Proceedings of the 21st International Sympo-sium on Okhotsk Sea Sea Ice, 19–24 February 2006, Mombetsu, Hokkaido, Japan. R. 223-224.
6. Zarubina D. V., Shumilov I. V., Romanyuk V. A., Latkovskaya E. M. Assessment of spatiotemporal variability of a coastal polynya in the Sea of Okhotsk // InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Proc. int. conf. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University. - 2026 a. (in Russ.)
7. Mei Z., Legendre L., Gratton Y., Tremblay J., LeBlanc B., Klein B., Gosselin M. Phyto-plankton production in the North Water Polynya: size-fractions and carbon fluxes, April to July 1998. Marine Ecology Progress Series, 2003. Vol. 256, pp. 13-27.
8. Tremblay J., Smith Jr W. Primary production and nutrient dynamics in polynyas. Elsevier Oceanography Series, 2007. V. 74. P. 239-269.
9. Kosobokova K. N. Zooplankton of the Arctic Basin (Community Structure and Regional Features of Quantitative Distribution): Dis. for the Degree of Doctor of Biological Sciences. P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow. 320 p., 2010.(in Russ.)

© Zarubina D.V. et al., 2026

10. Patilea, C., G. Heygster, M. Huntemann, & G. Spreen. Combined SMAP/SMOS Thin Sea Ice Thickness Retrieval. TheCryosphere, 13, 675–691. 2019. doi:10.5194/tc-13-675-2019
11. Official website for SMOS data (Soil Moisture and Ocean Salinity). Data collections. Online resource: https://earth.esa.int/eogateway/missions/smos (accessed March 13, 2026)
12. Official website for SMAP (Soil Moisture Active Passive) data. Products. Online resource: https://smap.jpl.nasa.gov (accessed March 13, 2026).
13. Shumilov I. V., Vaschenko D. A., Romanyuk V. A. Computer program registration certificate No. 2024662834. "NetCDFProcessing". 2024. No. 2024661302 datedMay 20, 2024; publishedMay 30, 2024. (in Russ.)
14. Shumilov I. V., Romanyuk V. A., Pishchalnik V. M. Computer Program Registration Certificate No. 2023688937. "Ice Data Processing". 2023. No. 2023682641 dated 10/30/2023; published 12/25/2023. (in Russ.)
15. Official website of the Python programming language. Online resource: https://www.python.org/ (accessed March 16, 2026).
16. Official website of the QGIS geographic information system. Online resource: https://www.qgis.org/ (accessed March 16, 2026).
17. Huntemann M., Heygster G., Kaleschke L., Krumpen T., Mäkynen M., Drusch M. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze-up period from SMOS high incident angle observations. The Cryosphere, 8(2), 2014. P. 439-451.
18. Copernicus Climate Change Service web portal. Climate Data Store. Datasets. Online resource: https://cds.climate.copernicus.eu (accessed March 13, 2026).
19. Jackson et al. Ocean colour daily data from 1997 to present derived from satellite observations, Version 6.0. Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS). 2022. https://doi.org/10.24381/cds.f85b319d.
20. Zarubina D. V., Shumilov I. V., Latkovskaya E. M., Pishchalnik V. M., Romanyuk V. A., Nikulina I. V. "Oases" of life in ice: dynamics of chlorophyll-a concentration in the polynya of the Sea of Okhotsk on the example of the southeastern shelf of Sakhalin Island // Timonov readings. Proceedings of the II scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the establishment of the oceanographic faculty. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics - 2026 b. Pp. 33-36 (in Russ.)

© Зарубина Д.В. и др., 2026

УДК 528.8:551.465:551.510
DOI: 10.7868/S2658670326030030

Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного CO_2, хлорофилла-а и температуры поверхности моря в Охотском море: региональный фон и особенности залива Анива

Романюк Валерий Анатольевич
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Латковская Елена Максимовна
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Зарубина Дарья Васильевна
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Шумилов Илья Валерьевич
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

Пищальник Владимир Михайлович
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН; Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Никулина Ирина Владимировна
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Аннотация. На основе спутниковых наблюдений, данных реанализа и наземных измерений (CAMS EGG4, MODIS/Aqua R2022, OSTIA L4 и NOAA/GML) за период 2003–2020 гг. выполнен сравнительный анализ содержания атмосферного CO_2 на уровне 1000 гПа, концентрации хлорофилла-а и температуры поверхности моря в заливе Анива и в акватории Охотского моря, принятой в качестве регионального фона. Установлено, что содержание CO_2 устойчиво возрастало во всех рассматриваемых рядах – на 2,05 ppm/год над заливом Анива и 2,06 ppm/год над акваторией Охотского моря – синхронно с глобальным трендом NOAA/GML ($r = 0,997$). Показано, что сезонная и пространственная структура

© Romanyuk V.A. et al., 2026

океанологических параметров различалась между районами существенно сильнее, чем динамика CO_2: максимум концентрации хлорофилла-а в заливе Анива достигался в апреле, тогда как в акватории Охотского моря – в июне, при этом максимум температуры поверхности моря в обоих районах приходился на август. Среднегодовые значения пространственных медиан для залива и акватории Охотского моря составляли соответственно 1,41 и 0,75 мг/м³ (концентрация хлорофилла-а) и 6,83 и 3,91 °C (температура поверхности моря). После исключения линейного тренда и сезонного цикла межрайонная разность аномалий CO_2 была положительно связана с разностью аномалий температуры поверхности моря ($r = 0,36$; $p < 0,001$). Регрессионная модель с разностями аномалий температуры и логарифма концентрации хлорофилла-а описывала около 15% дисперсии межрайонной разности аномалий CO_2 ($R^2 = 0,15$). Коэффициент при температуре был статистически значимым ($p < 0,001$), тогда как коэффициент при логарифме концентрации хлорофилла-а с учётом температуры был статистически незначимым ($p = 0,62$). Лаговый анализ не выявил устойчивой запаздывающей связи CO_2 с температурой поверхности моря и концентрацией хлорофилла-а, что в большей степени согласуется с влиянием общего атмосферного переноса, чем с прямым проявлением морского газообмена.

Ключевые слова: Охотское море, залив Анива, CO_2, CAMS EGG4, хлорофилл-а, MODIS/Aqua, температура поверхности моря, OSTIA, NOAA/GML

Благодарности. Исследование температуры воды выполнялось Шумиловым И.В., Никулиной И.В. и Пищальником В.М. в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM 2024-0002). Анализ содержания CO_2, выполнен Романюком В.А., Зарубиной Д.В. и Латковской Е.М. в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета (FEFF-2024-0004) «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий».

Для цитирования: Романюк В.А., Латковская Е.М., Зарубина Д.В., Шумилов И.В., Пищальник В.М., Никулина И.В. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного CO_2, хлорофилла-а и температуры поверхности моря в Охотском море: региональный фон и особенности залива Анива // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 37–52. DOI: 10.7868/S2658670326030030

Дата поступления в редакцию: 20.06.2026
Дата принятия к публикации: 15.09.2026

© Романюк В.А. и др., 2026

UDC 528.8:551.465:551.510
DOI: 10.7868/S2658670326030030

Seasonal and interannual variability of atmospheric CO_2, chlorophyll-a, and sea surface temperature in the Sea of Okhotsk: regional background and distinctive features of Aniva Bay

Valery A. Romanyuk
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Elena M. Latkovskaya
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Daria V. Zarubina
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Ilya V. Shumilov
Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

Vladimir M. Pishchalnik
Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS; Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Irina V. Nikulina
Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Abstract. Based on satellite observations, reanalysis data, and ground-based measurements (CAMS EGG4, MODIS/Aqua R2022, OSTIA L4, and NOAA/GML) for 2003–2020, a comparative analysis was conducted of atmospheric CO_2 mole fractions at the 1000 hPa level, chlorophyll-a concentrations, and sea surface temperature in Aniva Bay and the Okhotsk Sea, the latter being used as the regional background area. CO_2 mole fractions showed a persistent increase in all analysed time series, at rates of 2.05 ppm per year over Aniva Bay and 2.06 ppm per year over the Okhotsk Sea, closely following the global NOAA/GML trend (r = 0.997). The seasonal and spatial patterns of the oceanographic parameters differed substantially more between the two regions than did the CO_2 dynamics. Chlorophyll-a concentrations peaked in April in Aniva Bay and in

© Romanyuk V.A. et al., 2026

June in the Okhotsk Sea, whereas maximum sea surface temperatures occurred in August in both regions. The annual means of the spatial medians for Aniva Bay and the Okhotsk Sea were 1.41 and 0.75 mg m^{-3}, respectively, for chlorophyll-a concentration, and 6.83 and 3.91 °C, respectively, for sea surface temperature. After removal of the linear trend and seasonal cycle, the difference in atmospheric CO_2 anomalies between the two regions was positively associated with the corresponding difference in sea surface temperature anomalies ($r = 0.36$; $p < 0.001$). The regression model incorporating the interregional differences in sea surface temperature anomalies and log-transformed chlorophyll-a concentration anomalies accounted for approximately 15% of the variance in the interregional CO_2 anomaly difference ($R^2 = 0.15$). The coefficient for sea surface temperature was statistically significant ($p < 0.001$), whereas the coefficient for log-transformed chlorophyll-a concentration was not statistically significant after accounting for sea surface temperature ($p = 0.62$). Lagged correlation analysis did not reveal a consistent lagged association of CO_2 with sea surface temperature or chlorophyll-a concentration. This pattern is more consistent with the influence of common atmospheric transport than with a direct air–sea gas exchange signal.

Keywords: Sea of Okhotsk, Aniva Bay, atmospheric CO_2, CAMS EGG4, chlorophyll-a, MODIS/Aqua, sea surface temperature, OSTIA, NOAA/GML

Acknowledgments. The water temperature study was conducted by I.V. Shumilov, I.V. Nikulina, and V.M. Pishchalnik as part of the state assignment at the Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS (FWWM 2024-0002). The analysis of CO2 content was carried out by V.A. Romanyuk, D.V. Zarubina, and E.M. Latkovskaya as part of the state assignment of Sakhalin State University (FEFF-2024-0004) “Development of scientific foundations for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholithosystems in coastal‑marine wetlands and adjacent marine areas”.

For citation: Romanyuk V.A., Latkovskaya E.M., Zarubina D.V., Shumilov I.V., Pishchalnik V.M., Nikulina I.V. (2026). Seasonal and interannual variability of atmospheric CO_2, chlorophyll-a, and sea surface temperature in the Sea of Okhotsk: regional background and distinctive features of Aniva Bay. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 37–52. doi: 10.7868/S2658670326030030 (in Russ.).

Received: 20.06.2026
Accepted: 15.09.2026

Введение

Изучение взаимодействия атмосферы и морской поверхности необходимо для понимания сезонной и межгодовой изменчивости регионального углеродного цикла. Для Охотского моря эта задача особенно актуальна из-за сочетания водообмена с Тихим океаном, сезонного прогрева, вертикального перемешивания и биогеохимических процессов, формирующих выраженную пространственную неоднородность [1]. В прибрежных водах южного Сахалина к этим факторам добавляются береговой сток и локальная динамика. Особый интерес представляет залив Анива – морская часть полигона «Карбон-Сахалин»,

© Романюк В.А. и др., 2026

где сезонная изменчивость гидрологических и биооптических характеристик проявляется отчетливее, чем в осредненных полях моря [2–4]. Предыдущие исследования описали пространственно-временную изменчивость концентрации хлорофилла-а и различия сроков развития фитопланктона в заливе Анива и Охотском море [5–7]. Вместе с тем совместная изменчивость атмосферного CO_2, хлорофилла-а и температуры поверхности моря (ТПМ) в локальном и региональном масштабах до сих пор не получила достаточной количественной оценки. Настоящая работа объединяет спутниковые наблюдения и данные реанализа для оценки содержания атмосферного CO_2, концентрации хлорофилла-а и ТПМ и сопоставляет их изменчивость в локальном (залив Анива) и региональном (Охотское море) масштабах.

Длительные спутниковые ряды и данные реанализа позволяют рассмотреть эту изменчивость на единой временной шкале, однако требуют осторожной интерпретации. Концентрация хлорофилла-а характеризует состояние поверхностного слоя, но не служит прямой мерой первичной продукции или поглощения углерода, а содержание CO_2 по данным CAMS EGG4 на уровне 1000 гПа характеризует атмосферный фон над акваторией. В работе показатели для Охотского моря рассматриваются как региональный фон, относительно которого оцениваются локальные отклонения в заливе. Цель исследования – оценить сезонную и межгодовую изменчивость содержания CO_2 над заливом Анива и Охотским морем, сопоставить её с глобальным фоном и определить связи с концентрацией хлорофилла-а и температурой поверхности моря. При этом ожидается, что после исключения глобального тренда и сезонного цикла локальный сигнал моря в содержании CO_2 в приземной атмосфере окажется слабым: на уровне 1000 гПа концентрация CO_2 определяется преимущественно крупномасштабным атмосферным переносом, а грубое пространственное разрешение реанализа ограничивает выделение локальных особенностей залива. Такой анализ позволяет также оценить применимость реанализа такого разрешения для мониторинга в рамках программы «Карбон-Сахалин» и сформировать базовую линию для будущих прямых измерений pCO_2 морской воды.

1. Район исследования

Акватория Охотского моря площадью 1 597 тыс. км², принятая в качестве регионального фона, не включает залив Анива. Выбор акваторий разного масштаба обусловлен задачей сопоставления особенностей прибрежного залива с обобщёнными характеристиками морского бассейна. Показатели для залива характеризуют локальные условия, а показатели для фоновой акватории дают обобщённую характеристику Охотского моря. Межрайонная разность рассчитывалась как разность значений для залива и фоновой акватории и

© Romanyuk V.A. et al., 2026

использовалась для оценки отклонений характеристик залива от регионального фона.

2. Материалы и методы исследования

Анализ охватывал период 2003–2020 гг. (216 месяцев). Для каждого района рассчитывались сезонный цикл, линейный тренд и аномалии после исключения тренда и средних значений для соответствующих календарных месяцев. Содержание CO_2 оценивалось по ежемесячным данным реанализа CAMS EGG4 на уровне 1000 гПа с разрешением 0,75°×0,75° [8]. Массовая доля CO_2 переводилась в ppm с учетом молярных масс сухого воздуха и CO_2. Среднее рассчитывалось по значениям в ячейках, центры которых располагались внутри исследуемых акваторий (две ячейки для залива Анива и 390 ячеек для Охотского моря).

Концентрация хлорофилла-а определялась по ежемесячным картированным данным MODIS/Aqua L3 R2022 с пространственным разрешением около 4 км [9]. Рассчитывалась пространственная медиана значений концентрации; в статистическом анализе использовался ее десятичный логарифм. В анализ включались месяцы с покрытием не менее 30% площади акватории: 209 месяцев для залива и 167 для Охотского моря. Покрытие данными было сезонно неравномерным. В заливе Анива медианная доля акватории с валидными пикселями составляла 89,3% зимой (декабрь – февраль) и 99,3–99,8% в остальные сезоны, а покрытие было ниже порога только в декабре (7 месяцев). В акватории Охотского моря медианное покрытие снижалось до 12,8% зимой (диапазон 2,4–55,2%) против 79,4% весной, 98,3% летом и 99,1% осенью, поэтому из 54 зимних месяцев условию покрытия соответствовали лишь 9, а все 49 исключённых месяцев приходились на период с ноября по февраль. Логарифмическое преобразование ($\log_{10}$) применялось для снижения влияния высоких пиковых значений и стабилизации дисперсии при включении данной переменной в статистические модели. Включались месяцы с покрытием не менее 30% площади: 209 для залива и 167 для Охотского моря.

Медианная по пикселям полнота рядов MODIS/Aqua, то есть доля месяцев с валидными наблюдениями, составляла 93,1% в заливе и 64,8% в акватории Охотского моря (рис. 1). Наименьшая обеспеченность наблюдениями отмечалась в северо-западной и северо-восточной частях Охотского моря. В связи с этим пространственные распределения хлорофилла-а в данных районах, особенно в зимне-весенний период, должны интерпретироваться с учетом сокращенного объема доступных наблюдений [9].

Температура поверхности моря определялась по ежедневным данным OSTIA L4 с разрешением 0,05°×0,05° [10]. Поля осреднялись по месяцам, затем рассчитывалась пространственная медиана. Глобальный ряд NOAA/GML использовался для сравнения трендов и разностей с CAMS EGG4. Вследствие

© Романюк В.А. и др., 2026

различной репрезентативности продукты не рассматривались как взаимозаменяемые [11].

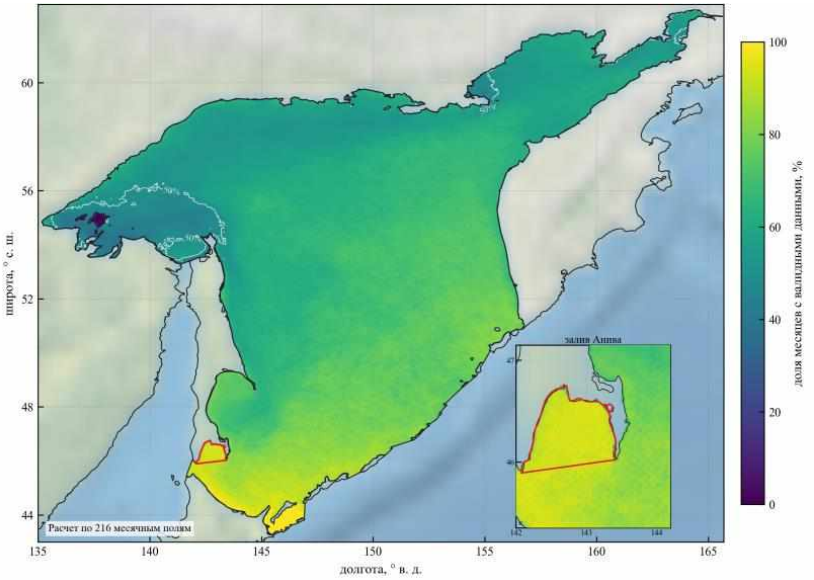


Рис. 1. *Доля месяцев с валидными данными MODIS/Aqua по хлорофиллу-а за 2003–2020 гг., рассчитанная для каждого пикселя по 216 месячным полям*

Совместное использование CAMS EGG4, MODIS/Aqua и OSTIA обусловлено задачей сопоставления атмосферных и океанологических характеристик в едином временном интервале 2003–2020 гг. Несмотря на различия в пространственном разрешении, для каждого района формировались месячные ряды агрегированных показателей: среднего содержания атмосферного CO_2 и пространственных медиан концентрации хлорофилла-а и ТПМ. Статистический анализ выполнялся для этих временных рядов; отдельные ячейки и пиксели разных продуктов непосредственно между собой не сопоставлялись. Такой подход позволяет исследовать согласованность сезонной и межгодовой изменчивости показателей на уровне выбранных акваторий. При этом пространственное агрегирование и единый месячный шаг не устраняют различий в репрезентативности исходных данных. Залив Анива представлен только двумя ячейками CAMS EGG4 с шагом сетки 0,75°×0,75°, поэтому полученный ряд CO_2 характеризует атмосферные условия в районе залива с ограниченной пространственной детализацией. Пространственные медианы хлорофилла-а характеризуют доступную для наблюдений часть акватории,

© Romanyuk V.A. et al., 2026

состав которой меняется в зависимости от покрытия данными. Эти особенности ограничивают возможность выявления локальных связей между атмосферным CO_2 и состоянием морской поверхности. Полученные зависимости интерпретируются как статистические связи между агрегированными показателями и не используются для непосредственной оценки потока CO_2 через поверхность моря.

Связи оценивались с помощью коэффициента корреляции Пирсона и множественной линейной регрессии. В межрайонном анализе использовались синхронные разности «залив минус акватория Охотского моря». Для этих разностей аномалий (после исключения тренда и сезонного цикла) методом наименьших квадратов оценивалась статистическая связь межрайонной разности CO_2 с разностями ТПМ и десятичного логарифма концентрации хлорофилла-а:

$$\Delta CO_2' = a_0 + a_1 \cdot \Delta \lg(Chl)' + a_2 \cdot \Delta T', \quad (1)$$

где Δ – разность «залив Анива минус акватория Охотского моря», штрих обозначает аномалию, Chl – концентрация хлорофилла-а, T – температура поверхности моря. Для построения модели использовались 167 месяцев с данными по обоим районам. Дополнительно оценивалась корреляция тех же разностей при сдвиге рядов на срок до трёх месяцев, чтобы проверить возможное запаздывание одного показателя относительно другого. Картографирование распределений хлорофилла-а в апреле и июне, ТПМ в августе, а также отношения апрельской концентрации хлорофилла-а к июньской выполнялось в программной среде QGIS. Полнота данных MODIS/Aqua определялась для каждого пикселя по 216 месячным полям.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Сезонная изменчивость

Среднее содержание CO_2 за период 2003–2020 гг. составляло 398,56 ppm над заливом Анива и 397,36 ppm над акваторией Охотского моря. Сезонная изменчивость в обоих районах имела схожий характер: максимальные концентрации отмечались весной, минимальные в конце лета (рис. 2а). Амплитуда сезонного цикла составляла соответственно 14,58 и 15,54 ppm, что отражает характерную сезонность содержания CO_2 в нижней тропосфере.

Сезонный ход концентрации хлорофилла-а, напротив, различался между исследуемыми районами. В заливе Анива максимум наблюдался в апреле, тогда как в Охотском море в июне (рис. 2б). Средние за 2003–2020 гг. значения временных рядов месячных пространственных медиан составляли 1,41 мг/м³ в заливе и 0,75 мг/м³ в акватории Охотского моря. Максимум ТПМ в обоих районах отмечался в августе. Средние за 2003–2020 гг. значения составляли 6,83 °C в заливе и 3,91 °C в акватории Охотского моря (рис. 2в). Более раннее наступление максимума концентрации хлорофилла-а в заливе Анива, вероятно, связано с ускоренным весенним прогревом залива и более ранним

© Романюк В.А. и др., 2026

формированием благоприятных условий для фитопланктона. В свою очередь, осреднение по обширной акватории Охотского моря объединяет районы, различающиеся по срокам сезонного прогрева и фазам развития фитопланктона [2, 3, 5–7]. Из-за сезонно меняющегося покрытия данными MODIS пространственные медианы хлорофилла-а характеризуют наблюдаемую часть акватории, а не строго постоянную пространственную область во всех месяцах.

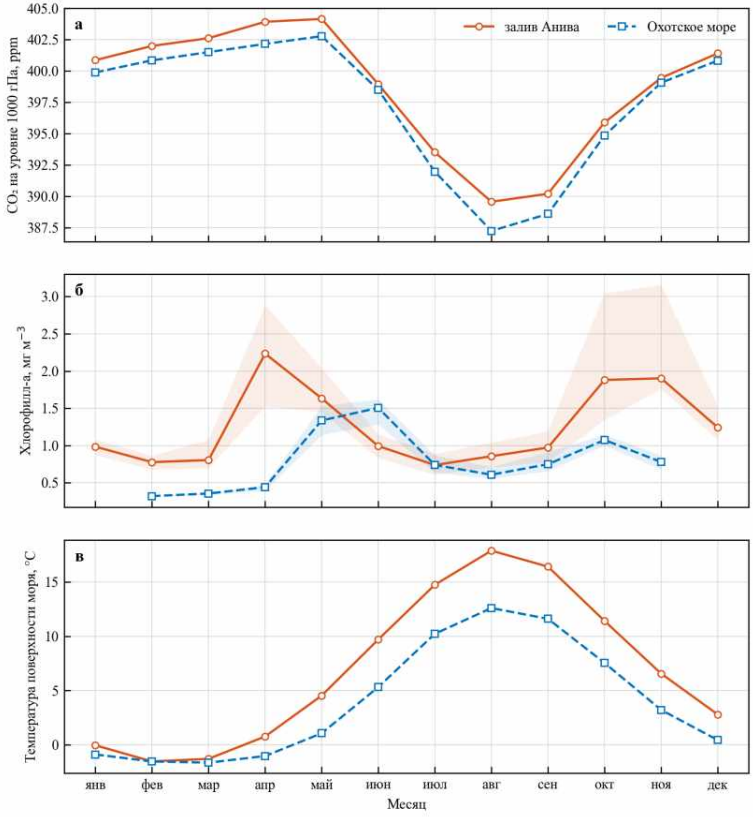


***Рис. 2**. Средний сезонный ход CO_2 на уровне 1000 гПа (а), хлорофилла-а (б) и ТПМ (в) в зал. Анива и в акватории Охотского моря за 2003–2020 гг.*

3.2. Межгодовой рост CO_2 и глобальный атмосферный фон

В 2003–2020 гг. содержание CO_2 устойчиво росло во всех рядах. Скорость линейного роста составляла 2,05 ppm/год над заливом Анива, 2,06 ppm/год над

© Romanyuk V.A. et al., 2026

акваторией Охотского моря и 2,19 ppm/год по данным NOAA/GML. Корреляция исходных среднегодовых значений CAMS EGG4 с глобальным рядом NOAA/GML достигала 0,997 для обоих районов (рис. 3а). Высокая корреляция преимущественно отражала общий долговременный рост рядов, согласующийся с доминирующей ролью глобального накопления CO_2 в их межгодовой динамике. Этот результат не позволяет судить об изменении интенсивности морского источника или стока CO_2 [11].

Средние значения по данным CAMS EGG4 превышали значения NOAA/GML на 5,81 ppm над заливом Анива и на 4,61 ppm над акваторией Охотского моря (рис. 3б). Смещение может отражать влияние антропогенных и биосферных континентальных источников: вблизи суши воздух на уровне 1000 гПа в северных средних широтах обогащён CO_2 относительно глобального морского пограничного слоя. Вклад могут вносить и различия в пространственной репрезентативности и формировании продуктов. NOAA/GML основан на измерениях фоновой наблюдательной сети, а CAMS EGG4 представляет модельно-ассимиляционное поле [8, 11]. Поэтому разность между продуктами не может служить количественной оценкой региональной эмиссии CO_2.

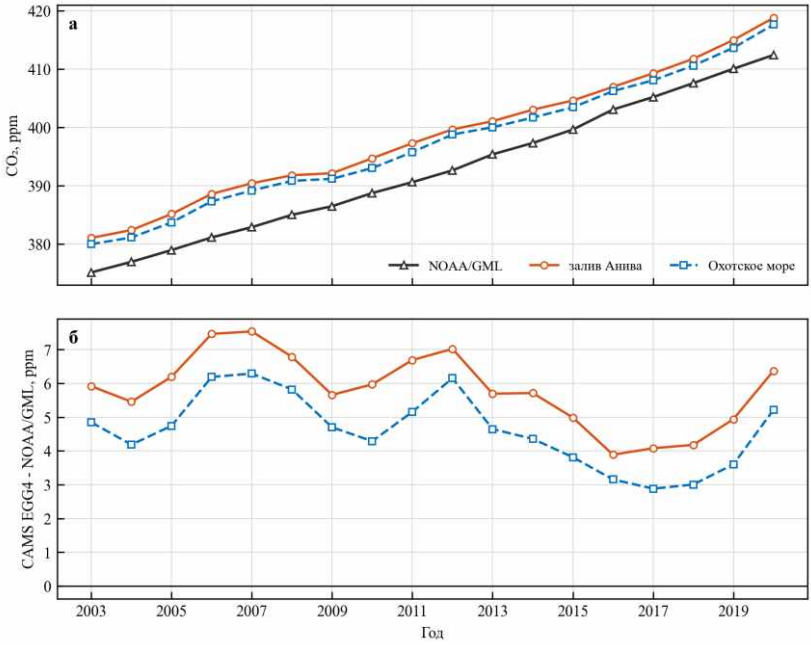


Рис. 3. *Межгодовая изменчивость CO_2 по CAMS EGG4 и NOAA/GML (а) и разность между региональными значениями CAMS EGG4 и глобальным средним NOAA/GML (б)*

© Романюк В.А. и др., 2026

3.3. Межрайонные различия и связи аномалий

Средняя разность значений для залива Анива и акватории Охотского моря составляла 1,20 ppm для CO_2 и 2,92 °C для ТПМ. При этом температурный контраст и различия в сроках сезонного максимума хлорофилла-а были выражены значительно сильнее, чем межрайонные различия трендов CO_2. Такая особенность согласуется с мелководностью залива, влиянием речного стока и водообменом через пролив Лаперуза [4].

После удаления линейного тренда и сезонного цикла статистически значимая связь между аномалиями CO_2 и логарифмом концентрации хлорофилла-а в отдельных районах не выявлена. Межрайонная разность аномалий CO_2 была положительно связана с разностью аномалий ТПМ ($r = 0,36$; $p < 0,001$), тогда как значимая связь с разностью аномалий логарифма концентрации хлорофилла-а отсутствовала. Модель, построенная по уравнению (1) для 167 месяцев, была статистически значима в целом ($p < 0,001$); средняя квадратическая ошибка составила около 0,8 ppm, коэффициент детерминации R^2 составил 0,15. Таким образом, модель описывала около 15% дисперсии межрайонной разности аномалий CO_2. Коэффициент при разности аномалий ТПМ был положительным и статистически значимым ($p < 0,001$), тогда как коэффициент при разности аномалий десятичного логарифма концентрации хлорофилла-а статистически не отличался от нуля ($p = 0,62$). Следовательно, значимый вклад хлорофилла-а при учёте ТПМ не выявлен.

Таблица 1. *Лаговые коэффициенты корреляции Пирсона между межрайонными разностями аномалий (зал. Анива минус акватория Охотского моря).*

Лаг, мес.	$\Delta T' \rightarrow \Delta CO_2'$			$\Delta \lg(Chl)' \rightarrow \Delta CO_2'$		
	n	r	p	n	r	p
0	216	0,36	<0,001	167	−0,02	0,81
+1	215	0,22	0,001	149	0,02	0,85
+2	214	0,07	0,34	131	−0,03	0,73
+3	213	−0,13	0,07	118	0,26	0,004

Лаговый анализ (табл. 1) показал, что связь межрайонных разностей аномалий CO_2 и ТПМ наиболее выражена при синхронном сопоставлении рядов ($r = 0,36$; $p < 0,001$). Когда разность аномалий ТПМ опережала разность аномалий CO_2 на один месяц, связь сохранялась, но была заметно слабее ($r = 0,22$; $p = 0,001$), а при лагах 2–3 месяца становилась статистически незначимой. Для разности аномалий логарифма концентрации хлорофилла-а при лагах 0–2 месяца значимой связи с межрайонной разностью аномалий CO_2 не выявлено. При лаге +3 месяца отмечена слабая положительная корреляция ($r = 0,26$; $p = 0,004$), однако она описывает лишь около 7 % изменчивости и не сопровождается последовательным усилением связи на соседних лагах. Таким

© Romanyuk V.A. et al., 2026

образом, лаговый анализ не выявил устойчивой запаздывающей связи межрайонной разности аномалий CO_2 с изменениями аномалий ТПМ или логарифма концентрации хлорофилла-а.

Выявленная зависимость согласуется с температурным контролем растворимости CO_2 [12]. Вместе с тем температура связана не только с растворимостью, но и с сезонным прогревом, стратификацией и интенсивностью перемешивания, поэтому на основании полученной связи влияние моря на содержание атмосферного CO_2 не может быть установлено однозначно. Более того, положительная связь между разностями аномалий CO_2 на уровне 1000 гПа и температуры поверхности моря может не отражать поток CO_2 через поверхность моря. Приход тёплого континентального воздуха способен одновременно повышать локальную температуру поверхности моря и приземную концентрацию CO_2, создавая корреляцию за счёт атмосферной адвекции, а не газообмена. Быстрое ослабление связи при лагах 1–3 месяца, представленное в табл. 1, не подтверждает ожидаемого запаздывания разности аномалий CO_2 относительно температурного сигнала при переносе углерода через поверхность моря: наблюдаемый максимум корреляции приходится на нулевой временной сдвиг. Отсутствие синхронной связи с хлорофиллом-а также не исключает биологического контроля, поскольку спутниковая концентрация хлорофилла-а, pCO_2 морской воды, газообмен и атмосферный перенос отражают различные, нередко смещенные во времени звенья углеродного цикла [13].

3.4. Пространственная структура хлорофилла-а и температуры поверхности моря

В апреле области повышенной концентрации хлорофилла-а были приурочены преимущественно к прибрежным и шельфовым водам (рис. 4а). Медианные значения составляли 2,23 мг/м³ в заливе Анива и 0,44 мг/м³ в акватории Охотского моря. В июне зоны повышенных концентраций распространялись на северную и западную части моря (рис. 4б), а медианные значения достигали 1,51 и 0,99 мг/м³ соответственно. Пространственное распределение отношения апрельских значений к июньским подтверждало более наступление сезонного максимума концентрации хлорофилла-а в заливе Анива (рис. 4г).

В августе отчетливо проявлялся широтный градиент ТПМ (рис. 4в). Медианные значения ТПМ составляли 17,91 °С в заливе Анива и 12,61 °С в акватории Охотского моря. Таким образом, межрайонные различия выражались как в сезонном смещении областей повышенной концентрации хлорофилла-а, так и в интенсивности летнего прогрева. При этом медиана, рассчитанная для обширной акватории Охотского моря, характеризовала общий региональный фон, но не отражала всего диапазона локальных условий.

© Романюк В.А. и др., 2026

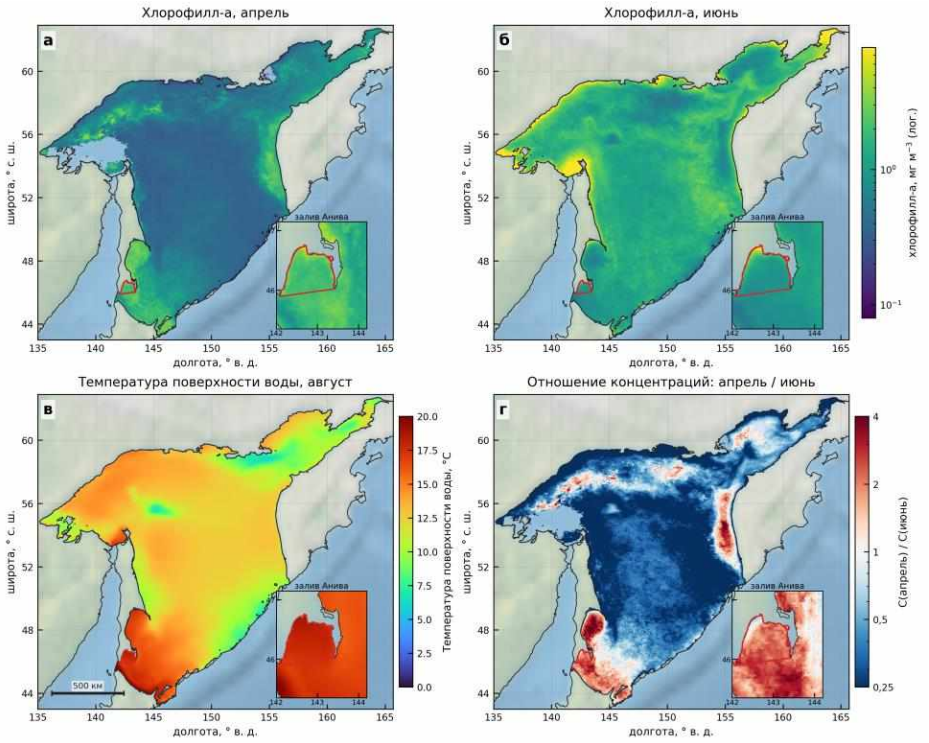


Рис. 4. *Среднемноголетние поля концентрации хлорофилла-а в апреле (а) и июне (б), температуры поверхности моря в августе (в) и отношения апрельской концентрации хлорофилла-а к июньской (г) за 2003–2020 гг.*

Заключение

В 2003–2020 гг. содержание атмосферного CO_2 над заливом Анива и акваторией Охотского моря увеличивалось со скоростью 2,05 и 2,06 ppm/год соответственно, следуя глобальной динамике. Локальная специфика залива значительно отчетливее проявлялась в сезонной изменчивости океанологических параметров: максимум концентрации хлорофилла-а наблюдался в апреле, тогда как в акватории Охотского моря – в июне, при этом максимум ТПМ в обоих районах приходился на август.

После удаления линейного тренда и сезонного цикла межрайонная разность аномалий атмосферного CO_2 была положительно связана с разностью аномалий ТПМ. Регрессионная модель описывала около 15% дисперсии межрайонной разности аномалий CO_2 ($R^2 = 0,15$). При этом вклад хлорофилла-а при учёте ТПМ был статистически незначимым ($p = 0,62$). Полученные

© Romanyuk V.A. et al., 2026

результаты характеризуют ограниченную объясняющую способность модели и не позволяют установить причинную роль рассмотренных факторов в изменчивости атмосферного CO_2. Возможности интерпретации результатов ограничены меньшей полнотой данных MODIS/Aqua в акватории Охотского моря и сравнительно грубым пространственным разрешением данных реанализа CAMS EGG4. Лаговый анализ с опережением предикторов на срок до трёх месяцев не выявил устойчивой запаздывающей связи межрайонной разности аномалий CO_2 с изменениями ТПМ или концентрации хлорофилла-а, что не позволяет однозначно объяснить эту связь прямым морским газообменом. Определение причинных связей между состоянием фитопланктона, температурой поверхности моря и атмосферным CO_2 требует синхронных измерений pCO_2 морской воды, характеристик газообмена и состава приземной атмосферы. Проведённый анализ даёт совместную количественную оценку содержания атмосферного CO_2, концентрации хлорофилла-а и ТПМ для полигона «Карбон-Сахалин» и указывает на ограниченные возможности реанализа с пространственным разрешением 0,75° для выявления локального влияния морской акватории на приземное содержание CO_2. Полученный результат имеет методическое значение, поскольку надёжная количественная оценка роли залива Анива как источника или стока CO_2 требует прямых измерений pCO_2 и параметров газообмена, а представленные временные ряды могут использоваться в качестве базовой линии для последующих исследований.

Литература

1. Nishioka J., Mitsudera H., Yasuda I., Liu H., Nakatsuka T. Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 126. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.08.012.
2. Ващенко Д.А., Пищальник В.М., Латковская Е.М., Купцова О.В. Оценка пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое залива Анива (Охотское море) по данным дистанционного зондирования Земли // Мониторинг. Наука и технологии. 2024. № 2(60). С. 35–41.
3. Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Частиков В.Н. Сезонная динамика гидролого-гидрохимических характеристик и концентрации хлорофилла а в заливе Анива в 2003 г. // Вода: химия и экология. 2014. № 4. С. 33–45.
4. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the Carbon-Sakhalin observational site, Aniva Bay, Sea of Okhotsk // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 3031. DOI: 10.3390/su16073031.
5. Ложкин Д.М., Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. Особенности температурных условий и распределения концентрации хлорофилла а в Охотском море в период нереста минтая по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 230–240.
6. Цхай Ж.Р. Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла-а методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2007. № 6. С. 37–45.

© Романюк В.А. и др., 2026

7. Takao S., Iida T., Isada T., Saitoh S.-I., Hirata T., Suzuki K. Bio-optical properties during the summer season in the Sea of Okhotsk // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 126. P. 233–241. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.010.
8. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. CAMS global greenhouse gas reanalysis (EGG4): monthly averaged fields. Dataset DOI: 10.24381/a90c7e33.
9. NASA Ocean Biology Distributed Active Archive Center. MODIS/Aqua Level-3 mapped chlorophyll data, R2022. DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2022.
10. Copernicus Marine Service. Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature Reprocessed. Product ID SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011. DOI: 10.48670/moi-00168.
11. Lan X., Tans P., Thoning K.W. Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. DOI: 10.15138/9N0H-ZH07.
12. Weiss R.F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas // Marine Chemistry. 1974. Vol. 2. No. 3. P. 203-215. DOI: 10.1016/0304-4203(74)90015-2.
13. Fay A.R., McKinley G.A. Correlations of surface ocean pCO_2 to satellite chlorophyll on monthly to interannual timescales // Global Biogeochemical Cycles. 2017. Vol. 31. No. 3. P. 436–455. DOI: 10.1002/2016GB005563.

References

1. Nishioka J., Mitsudera H., Yasuda I., Liu H., Nakatsuka T. Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean. Progress in Oceanography, 2014, Vol. 126, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.08.012.
2. Vashchenko D.A., Pishchalnik V.M., Latkovskaya E.M., Kuptsova O.V. Assessment of the spatiotemporal variability of surface chlorophyll-a concentration in Aniva Bay using Earth remote sensing data. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2024, No. 2(60), pp. 35-41 (in Russian).
3. Koreneva T.G., Latkovskaya E.M., Chastikov V.N. Seasonal dynamics of hydrological and hydrochemical characteristics and chlorophyll-a concentration in Aniva Bay in 2003. *Voda: khimiyaiekologiya*, 2014, No. 4, pp. 33-45 (in Russian).
4. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the Carbon-Sakhalin observational site, Aniva Bay, Sea of Okhotsk. *Sustainability*, 2024, Vol. 16, Article 3031. DOI: 10.3390/su16073031.
5. Lozhkin D.M., TskhayZh.R., Shevchenko G.V. Temperature conditions and chlorophyll-a distribution in the Sea of Okhotsk during pollock spawning from satellite data. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 230-240. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-230-240.
6. TskhayZh.R. Analysis of seasonal variations in chlorophyll-a concentration using empirical orthogonal functions in the Sea of Okhotsk from satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 6, pp. 37-45 (in Russian).
7. Takao S., Iida T., Isada T., Saitoh S.-I., Hirata T., Suzuki K. Bio-optical properties during the summer season in the Sea of Okhotsk. *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 126, pp. 233-241. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.010.
8. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. CAMS global greenhouse gas reanalysis (EGG4): monthly averaged fields. Dataset DOI: 10.24381/a90c7e33.

© Romanyuk V.A. et al., 2026

9. NASA Ocean Biology Distributed Active Archive Center. MODIS/Aqua Level-3 mapped chlorophyll data, R2022. DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2022.
10. Copernicus Marine Service. Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature Reprocessed. Product ID SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011. DOI: 10.48670/moi-00168.
11. Lan X., Tans P., Thoning K.W. Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. DOI: 10.15138/9N0H-ZH07.
12. Weiss R.F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 1974, Vol. 2, No. 3, pp. 203-215. DOI: 10.1016/0304-4203(74)90015-2.
13. Fay A.R., McKinley G.A. Correlations of surface ocean pCO_2 to satellite chlorophyll on monthly to interannual timescales. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, Vol. 31, No. 3, pp. 436-455. DOI: 10.1002/2016GB005563.

© Романюк В.А. и др., 2026

УДК 551.461
DOI: 10.7868/S2658670326030042

Анализ уровня моря и скорости течений в заливе Анива (Охотское море) по данным измерений и моделирования

Мысленков Станислав Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Ильин Всеволод Ильич
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0009-0006-5312-1326; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru

Архипкин Виктор Семенович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-1736-5618; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Пищальник Владимир Михайлович
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН; Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: Vpishchalnik@rambler.ru

Латковская Елена Максимовна
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается уровень моря и скорости течений в заливе Анива в Охотском море. Исследование выполнено на основе данных заякоренных станций, установленных в заливе в районе лагуны Буссе в период июнь–август 2023 года. Максимальный размах колебаний уровня моря составляет 1,59 м. Максимальная скорость течения в придонном горизонте на глубине 10 м составляет 0,41 м/с, а на глубине 15 м – 0,28 м/с. Средняя скорость течения составляет 0,077 и 0,068 м/с соответственно. Наиболее сильные течения направлены на северо-запад. Спектральный анализ уровня моря показал, что

© Myslenkov S.A. et al., 2026

наиболее четко выделяются четыре приливных гармоники: S2 – период 12,01 ч, M2 – 12,49 ч, K1 – 24,07 ч и O1 – 25,9 ч. В колебаниях скоростей течений выделяются периоды 11,9–12,3 ч и 24.2–26,1 ч, связанные с приливными гармониками. Также в течениях выделяется период колебаний 16,3 ч хорошо согласующийся с инерционным периодом на данной широте. Сравнение результатов моделирования с измерениями показало, что по уровню моря корреляция составляет 0,95, среднеквадратическая ошибка 0,1 м.

Ключевые слова: залив Анива, Охотское море, измерение уровня и течений, моделирование уровня и течений, ADCIRC, приливы.

Благодарности. Измерение течений выполнено Латковской Е.М. и Мысленковым С.А. в рамках государственного задания «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий (FEFF-2024-0004)». Обработка данных выполнена Пищальником В.М. в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM 2024-0002)

Для цитирования: Мысленков С.А., Ильин В.И., Архипкин В.С., Пищальник В.М., Латковская Е.М. Анализ уровня моря и скорости течений в заливе Анива (Охотское море) по данным измерений и моделирования // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 53–72. DOI: 10.7868/S2658670326030042

Дата поступления в редакцию: 15.06.2026
Дата принятия к публикации: 20.08.2026

UDC 551.461
DOI: 10.7868/S2658670326030042

Analysis of sea level and current velocity in Aniva Bay (Sea of Okhotsk) based on measurements and modeling data

Stanislav A. Myslenkov
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

© Мысленков С.А. и др., 2026

Vsevolod I. Ilin
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0006-5312-1326; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru

Victor S. Arkhipkin
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1736-5618; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Vladimir M. Pishchalnik
Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: Vpishchalnik@rambler.ru

Elena M. Latkovskaya
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Abstract. The sea level and current velocities in the Aniva Bay in the Sea of Okhotsk are considered. The study was carried out on the basis of data from moored stations installed in the bay in the area of Busse Lagoon in the period June-August 2023. The maximum range of sea level fluctuations is 1.59 m. The maximum current velocity in the bottom horizon at a depth of 10 m is 0.41 m/s, and at a depth of 15 m – 0.28 m/s. The average flow velocity is 0.077 and 0.068 m/s, respectively. The strongest currents are directed to the northwest. Spectral analysis of sea level has shown that four tidal harmonics are most clearly distinguished: S2 – the period of 12.01 hours, M2 – 12.49 hours, K1 – 24.07 hours and O1 – 25.9 hours. Periods of 11.9-12.3 hours and 24.2-26.1 hours associated with tidal harmonics are distinguished in fluctuations in current velocities. There is also an oscillation period of 16.3 hours in the currents, which is well consistent with the inertial period at this latitude. A comparison of the simulation results with measurements showed that the correlation for sea level is 0.95, with a standard deviation of 0.1 m.

Keywords: Aniva Bay, Sea of Okhotsk, level and current measurement, level and current modeling, ADCIRC, tides

Acknowledgments. The measurement of currents was carried out by Latkovskaya E.M. and Myslenkov S.A. within the framework of the state assignment "Creation of scientific foundations for the management of carbon uptake and accumulation processes by biomorpholitho systems of coastal marine wetlands and adjacent marine areas (FEFF-2024-0004)". Data processing was performed by V.M. Pischalnik as part of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM 2024-0002).

© Myslenkov S.A. et al., 2026

For citation: Myslenkov S.A., Ilin V.I., Arkhipkin V.S., Pishchalnik V.M., Latkovskaya E.M. (2026). Analysis of sea level and current velocity in Aniva Bay (Sea of Okhotsk) based on measurements and modeling data. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3,* 53–72. doi: 10.7868/S2658670326030042 (in Russ.).

Received: 15.06.2026
Accepted: 20.08.2026

Введение

Исследование колебаний уровня моря и циркуляции вод имеет важное значение при гидрологическом описании акваторий. Залив Анива расположен в южной части острова Сахалин и здесь находятся морские акватории карбонового полигона «Карбон-Сахалин», организованного в рамках проекта Карбоновые полигоны России. Также залив Анива имеет важное экономическое, транспортное и рыбохозяйственное значение, с перспективой развития марикультуры [1]. Ранее в рамках исследований на карбоновом полигоне были получены некоторые результаты анализа гидрофизических параметров в заливе Анива [2–5]. Данные о колебаниях уровня и особенностях циркуляции вод имеют важное значение при настройке и отладке биогеохимических моделей океана, позволяющих проводить анализ баланса парниковых газов.

Ранее исследование уровня моря и течений проводились в заливе Анива при помощи различных методов: динамический метод, гидродинамическое моделирование, прямые измерения [3]. Колебания уровня моря наиболее подробно изучены для порта Корсаков [6, 7]. Максимальный размах приливов в заливе Анива составляет 1,5–1,6 м [4]. По результатам моделирования уровня в заливе Анива высота штормовых нагонов может составлять до 1,7 м [8, 9]. По данным гидрологических съемок и расчетов динамическим методов циркуляция в заливе Анива, как правило, имеет антициклоническую завихренность, с выраженной сезонной изменчивостью [10]. По данным моделирования скорости течения в заливе находятся в пределах 10–25 см/с [11]. Наиболее масштабные измерения течений инструментальными методами проводились в 2002–2003 годах и описаны в работах [12, 13]. Согласно данным измерений, в центральной части залива Анива приливные течения невелики и их максимальные скорости не более 6–8 см/с в поверхностном и 4–5 см/с в придонном слое. В центральной части залива зафиксированы инерционные течения с амплитудой скорости около 20 см/с, а в юго-западной до 30–35 см/с. В работе [14] описываются основные особенности колебаний уровня и течений в проливе Лаперуза, а также указывается на наличие механизма генерации суточных колебаний течений, под воздействием береговых захваченных волн, возникающих из-за разности фаз

© Мысленков С.А. и др., 2026

приливов в Японском и Охотском морях. Тем не менее натурные измерения уровня и скорости течений в заливе Анива выполнялись лишь эпизодически, поэтому анализ новых данных может расширить и дополнить имеющиеся представления о динамике вод в заливе.

В 2023 году в заливе Анива проводились экспедиционные работы, в рамках которых были установлены заякоренные станции. Некоторые результаты анализа уровня моря и параметров ветрового волнения был представлены в работе [5], однако, гармонический анализ уровня и анализ течений по этим данным не проводились. Модель ADCIRC ранее неоднократно применялась для воспроизведения циркуляции и колебаний уровня в Охотском и Японском морях [4, 9]. Однако, результаты моделирования сопоставлялись только с архивными измерениями уровня моря, тогда как по современным данным оценок качества моделирования не выполнялось. В данной работе сделана попытка восполнить отмеченные выше пробелы.

Цель данной работы проанализировать уровень моря и скорость течений в заливе Анива по данным измерений на заякоренных станциях и сопоставить с результатами математического моделирования.

1. Измерения уровня и течений

В 2023 году на трех заякоренных станциях проводились измерения уровня моря и течений в заливе Анива в районе лагуны Буссе (рис. 1). Две станции были размещены на глубине 10 м и одна на глубине 15 м. Измерения выполнены при помощи модернизированного инклинометрического измерителя скорости и направления течений, оснащенного высокочувствительным датчиком гидростатического давления. Прибор был разработан в АО ИОРАН [15, 16]. Принцип его действия основан на измерении угла отклонения вертикальной оси прибора под воздействием набегающего потока, из которого рассчитываются скорость и направление течения. Угол фиксируется с помощью акселерометра, а направление – при помощи магнитометра. Согласно результатам лабораторной градуировки и натурных испытаний, рабочий диапазон измеряемых скоростей для данной модификации прибора составляет приблизительно 0,03–0,56 м/с, при относительной погрешности определения скорости порядка 3–15% в зависимости от скорости потока. Точность определения направления течения оценивается около ±10°. Более подробное описание конструкции прибора, электроники, методики градуировки и оценки погрешностей приведено в работах [15, 17].

Для определения глубины в приборе используется тензопреобразователь абсолютного гидростатического давления с диапазоном 0 – 2,5 Бар производства фирмы SendoSensors (Китай). Для компенсации температурного дрейфа тензопреобразователя давления в схему введен интегральный датчик температуры, обеспечивающий измерение температуры с точностью 0,1 °C.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Градуировка тензопреобразователей давления выполнялась на грузопоршневом манометре MTU-60 (класс точности 0,05) при температуре в диапазоне от ~0 до 30 °C, для учета термокомпенсации в последующих расчетах. Проведенные процедуры позволили достичь погрешности измерения давления в 0,25% от рабочего диапазона 1 – 2,5 Бар, что примерно соответствует погрешности определения глубины в ±1,9 см.

Инклинометры крепились к донному грузу коротким фалом около 0,5 м и учитывая длину корпуса инклинометра, его середина находилась примерно в 1 метре от дна, что позволило измерять придонные скорости течений. Измерения производились с интервалом 30 минут с продолжительностью серии 15 минут и частотой 10 Гц. В результате были получены данные об уровне моря и скорости придонных течений за периоды: с 20 июня 2023 до 15 августа 2023 года для первой станции, с 20 июня 2023 до 26 июля 2023 на второй и с 20 июня 2023 до 25 августа 2023 на третьей. В данной работе анализируется именно модуль скорости течения, а разложение на северную, восточную или вдольбереговую компоненты не проводилось. При анализе данных использовались осредненные за 15 минут серии. Результаты, полученные на станциях 1 и 2 были очень близки, поэтому далее в статье рассматриваются наиболее длинные ряды уровня и придонных течений на станциях 1 и 3.

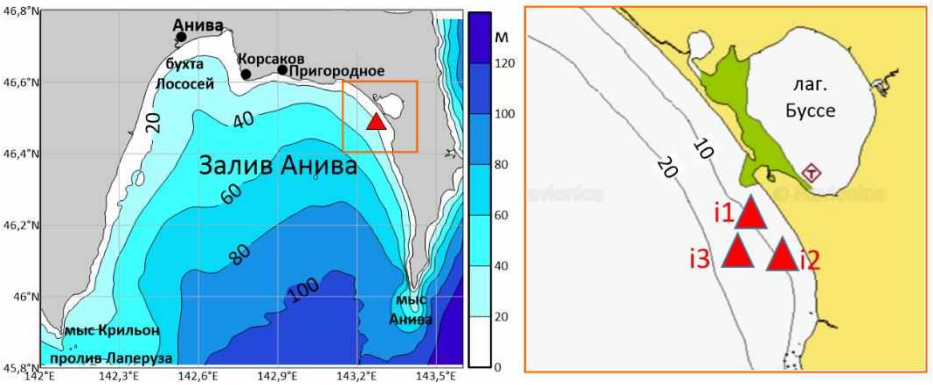


Рис. 1. *Район исследования. Измерения уровня моря и течений выполнены на станциях i1, i2, i3 [5]*

2. Гидродинамическая модель

Численное моделирование колебаний уровня моря и течений в исследуемой акватории было выполнено с использованием баротропной реализации гидродинамической модели ADCIRC (Advanced CIRCulation Model)

© Мысленков С.А. и др., 2026

[18, 19]. Модель решает систему решения полных уравнений мелкой воды в баротропном приближении методом конечных элементов на неструктурированной треугольной сетке. В данной работе применялась баротропная двумерная версия ADCIRC-2DDI в сферических координатах, что обеспечивает корректный учёт кривизны Земли на региональном масштабе и позволяет анализировать уровень моря и осредненные по вертикали течения.

ADCIRC уже на протяжении длительного времени успешно применяется для исследования колебаний уровня, течений и штормовых нагонов во многих районах Мирового океана [19–23]. Также данная модель использовалась в аналогичных задачах в районах Японского и Охотского моря, в том числе в проливе Лаперуза и заливе Анива, продемонстрировав высокое качество воспроизведения колебаний уровня моря и течений, в том числе сложных прибрежных районах [4, 24].

Важным преимуществом модели является использование неструктурированной сетки с переменным шагом, что позволяет задавать высокое разрешение в береговой зоне и низким в открытом море. ADCIRC-2DDI решает интегрированные по глубине уравнения мелкой воды в баротропном приближении (приближения Буссинеска, гидростатики, несжимаемости, отсутствие бароклинности) с квадратичной параметризацией придонного трения и позволяет получать поля уровня моря и осреднённых по глубине течений. В данной версии модели они имеют следующий вид:

1) уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R\cos\varphi}\left(\frac{\partial (UH)}{\partial \lambda} + \frac{\partial (VH\cos\varphi)}{\partial \varphi}\right) = 0, \qquad (1)$$

2) уравнения движения:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{R\cos\varphi}U\frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{1}{R}V\frac{\partial U}{\partial \varphi} - \left(\frac{\tan\varphi}{R}U + f\right)V =$$
$$= -\frac{1}{R\,cos\,\varphi}\frac{\partial}{\partial \lambda}\left[\frac{p_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta)\right] + \frac{\tau_{s\lambda}}{\rho_0 H} - \tau_b U, \qquad (2)$$

© Myslenkov S.A. et al., 2026

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\varphi}U\frac{\partial V}{\partial \lambda}+\frac{1}{R}V\frac{\partial V}{\partial \varphi}+\left(\frac{\tan\varphi}{R}U+f\right)U=$$
$$=-\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{p_s}{\rho_0}+g(\zeta-\eta)\right]+\frac{\tau_{s\varphi}}{\rho_0 H}-\tau_b V, \qquad (3)$$

где h – глубина моря относительно геоида; $H=\zeta+h$ – общая высота столба воды; C_b – коэффициент придонного трения; $\tau_b = C_b\frac{\sqrt{(U^2+V^2)}}{H}$ (придонное трение); t – время; λ,φ – долгота и широта; ζ– отклонение уровненной поверхности от геоида; U, V – осредненные по глубине течения; R– радиус Земли; $f=2\Omega sin\varphi$ – параметр Кориолиса; Ω – угловая скорость Земли;p_s – атмосферное давление на поверхности моря; g – ускорение силы тяжести; η – равновесный приливной потенциал Ньютона; ρ_0 – плотность морской воды; $\tau_{s\lambda}, \tau_{s\varphi}$ – ветровое напряжение на поверхности моря.

Придонное трение задается по квадратичному закону с коэффициентом C_d= 0,0025

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости принимался постоянным и равным 2 м²/с. На границе с сушей задавалось условие отсутствия нормального течения и свободного тангенциального скольжения. На открытых границах задавались амплитуды и фазы 9 приливных гармоник из глобальной базы приливов FES2014b (K1, K2, M2, M4, N2, O1, P1, Q1, S2) [25].

Форсинг модели включал приливный потенциал и граничные условия на открытых границах. В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа ERA5 (давление на уровне моря, компоненты ветра на высоте 10 м) с пространственным разрешением 0,25° и часовым шагом [26].

Перед построением расчетной сетки также была создана цифровая модель рельефа дна, основанная на данных оцифровки навигационных карт от Управления навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации [URL: https://navysoft.ru/] и глобальной базы рельефа дна GEBCO2024 [URL: https://www.gebco.net/]. Расчетная сетка была создана в программе Surface Modelling System. Получившаяся сетка содержит ~86000 узлов шагом от 50 метров в северной части залива Анива до 10 км в открытом море (рис. 2).

3. Результаты

Рассмотрим изменчивость уровня и течений по данным измерений. На рис. 3. представлены графики уровня моря и скорости придонных течений за весь период наблюдений на станциях 1 и 3, расположенных на глубинах 10 и 15 м (рис. 1). Анализ уровня моря выполнен по данным с 15-ти минутным осреднением исходных данных 10 Гц. Хорошо видны приливные колебания,

© Мысленков С.А. и др., 2026

сизигия и квадратура, а также месячное неравенство приливов. Максимальный размах колебаний уровня моря на станции 1 составляет 1,59 м, а для станции 3 – 1,57 м.

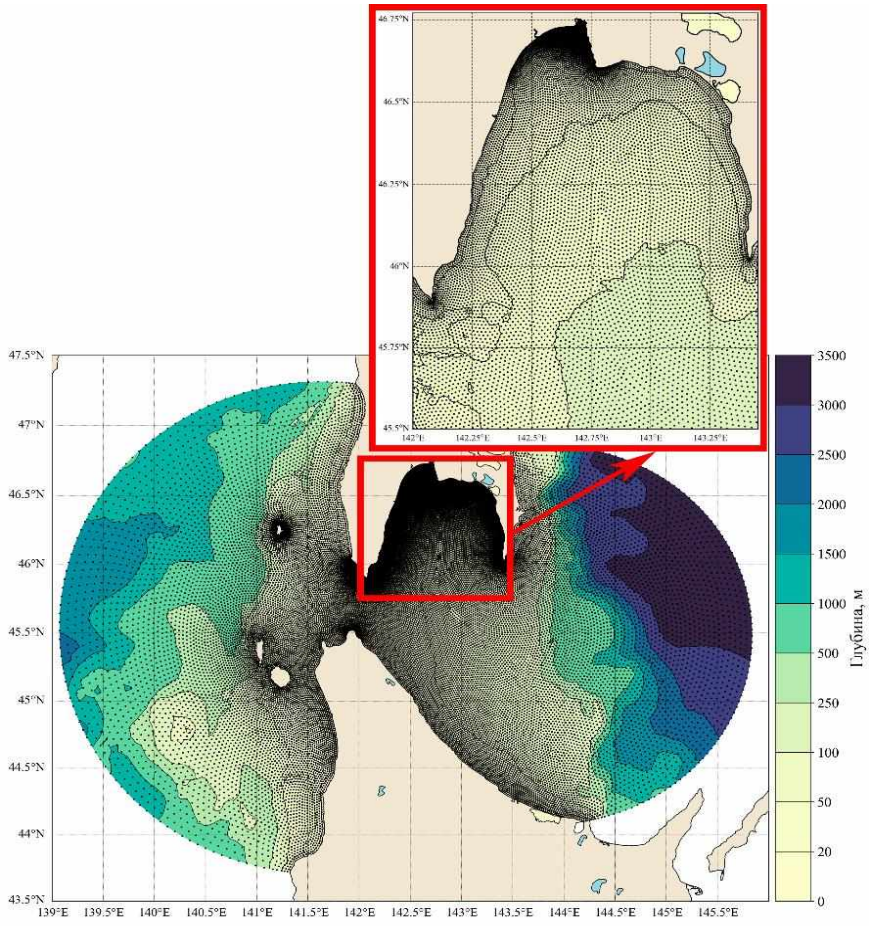


Рис. 2. *Вычислительная сетка модели ADCIRC для Охотского моря и залива Анива[4]*

Максимальная скорость течения на станции 1 составляет 0,41 м/с, а на станции 3 – 0,28 м/с. Средняя скорость течения составляет 0,077 и 0,068 м/с соответственно.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Розы течений представлены на рис. 4. Наиболее сильные течения направлены на северо-запад. На станции 1 выделяются северо-западный, южный и юго-западный румбы, а на станции 3, кроме северо-западного довольно большой процент повторяемости у юго-восточного и восточного румба.

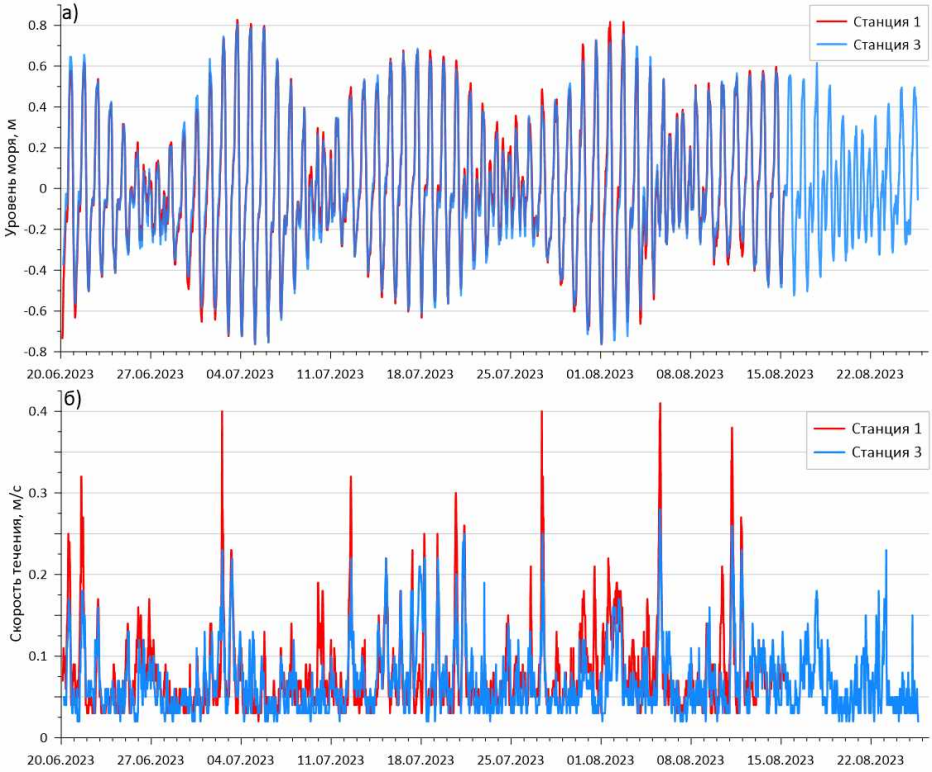


Рис. 3. *Уровень моря (а) и придонная скорость течения (б) на станции 1 (глубина 10 м) и станции 3 (глубина 15 м) с 20 июня по 25 августа 2023 года. Осреднение 15-ти минутное*

Спектральный анализ уровня моря на станции 1 за весь период наблюдений показал, что в районе измерений наиболее четко выделяются четыре приливных гармоники: S2 (главная солнечная) – период 12,01 ч, M2 (главная лунная) – 12,49 ч, K1 (лунно-солнечная деклинационная) – 24,07 ч и O1 (главная лунная) – 25,9 ч (рис. 5). Наиболее значимы последние три.

© Мысленков С.А. и др., 2026

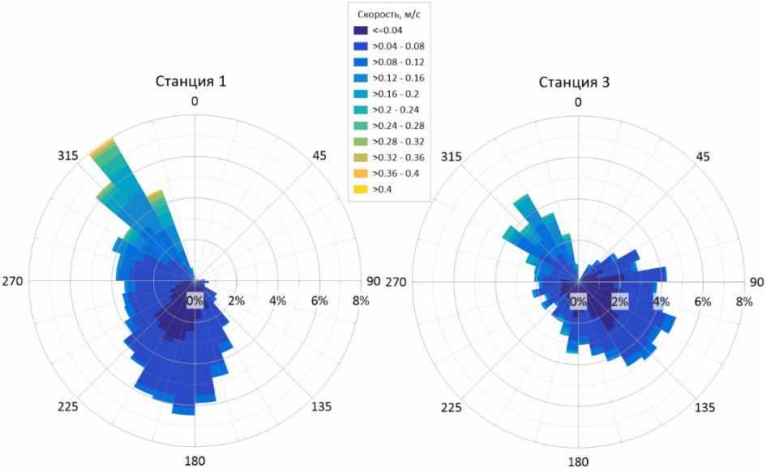


Рис. 4. *Розы течений (направление куда) на станциях 1 и 3*

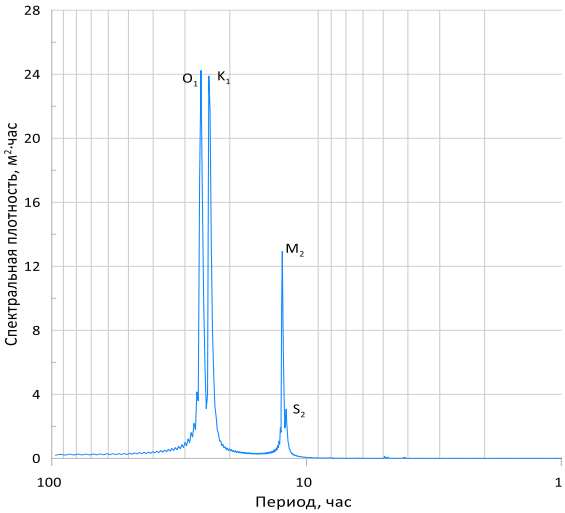


Рис. 5. *Спектр колебаний уровня моря на станции 1*

Гармонический анализ данных измерений уровня моря на станции 1 показал (табл. 1), что размах приливных колебаний уровня (без учета непериодической составляющей) составляет около 1,5 м. Приливы имеют смешанный характер с преобладанием суточной составляющей согласно классификации [27]:

$$F=(H_{K1}+H_{O1})/(H_{M2}+H_{S2})=1,61.$$

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Доминируют суточные гармоники O1 (0,23 м) и K1 (0,22 м); полусуточная M2 равна 0,20 м, S2 и P1 – 0,08 м. Остальные составляющие очень малы и не играют важной роли. Сравнение с результатами моделирования демонстрирует высокое согласие (табл. 1). Для всех гармоник отклонения амплитуд не превышает 0,02 м, а фаз – 11°. На других станциях результаты верификации сопоставимы.

Таблица 1. *Амплитуды и фазы приливных гармоник для станции 1 по данным измерений и моделирования.*

Гарм.	Ампл. (измерения), м	Фаза (измерения) (°)	Ампл. (модель), м	Фаза (Модель), °	ΔA, м	ΔФаза, °
K1	0,22	57	0,21	58	-0,01	1
M2	0,2	171	0,2	170	0	-1
M4	0,01	87	0,01	84	0	-3
N2	0,03	157	0,03	151	0	-6
O1	0,23	39	0,22	32	-0,01	-7
P1	0,08	60	0,08	55	0	-5
S2	0,08	223	0,1	212	0,02	-11

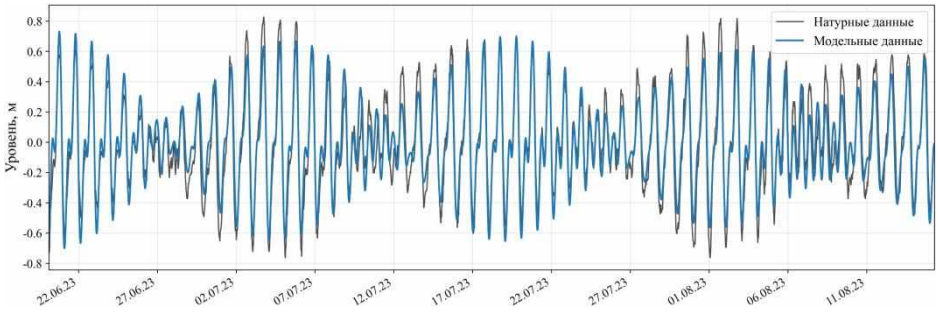


Рис. 6. *Уровень моря по данным измерений и моделирования на станции 1*

Далее было выполнено сравнение результатов моделирования с данными измерений. На рис. 6 представлено сравнение уровня моря с данными измерений на станции 1. Видно, что в целом модель хорошо воспроизводит фазу приливов, однако, присутствует занижение минимумов и максимумов в сизигию.

© Мысленков С.А. и др., 2026

Диаграмма рассеяния для уровня моря по данным измерений и по результатам моделирования представлена на рис. 7. Разброс облака точек небольшой, однако, наблюдается наклон линии линейной регрессии, относительно биссектрисы. Среднеквадратическая ошибка составляет ~0,1 м, коэффициент корреляции составляет 0,95.

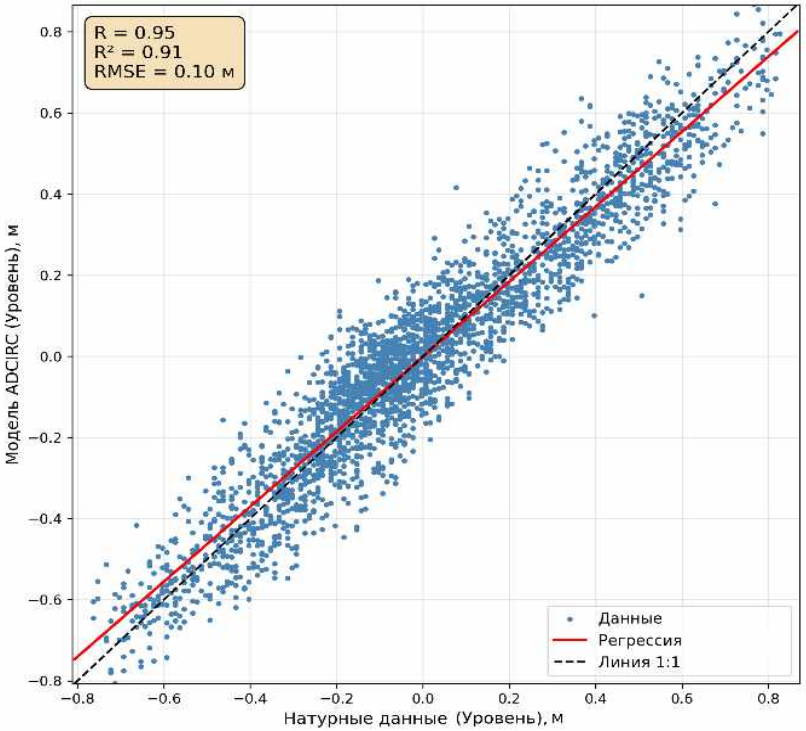


Рис. 7. *Диаграмма рассеяния для уровня моря по данным измерений и моделирования на станции 1*

Рассмотрим небольшой период для совместного анализа уровня и течений (рис. 8). В период с 15 по 20 июля четко выделяются максимумы течений (0,2–0,25 м/с), имеющие суточную периодичность. В этот же период видны небольшие пики с суточной периодичностью со скоростями 0,08–0,1 м/с, но со смещением на 12–14 часов относительно колебаний с высокими скоростями течений. Далее суточная/полусуточная периодичность прекращается и с 20 по 21

© Myslenkov S.A. et al., 2026

июля наблюдаются 2 пика скорости более 0,25 м/с, с периодом около 16 часов. Это событие начинается в тот момент, когда более отчетливо начинает проявляется полусуточная гармоника в колебаниях уровня. Таким образом, в некоторые отрезки времени существуют довольно сильные колебания скорости течения с периодами ~ 12 ч, имеющими, вероятно, приливную природу, а также с периодом ~ 16 ч соответствующими инерционному периоду. Однако, проявляются эти колебания эпизодически, что свидетельствует о сложности процессов их вызывающих.

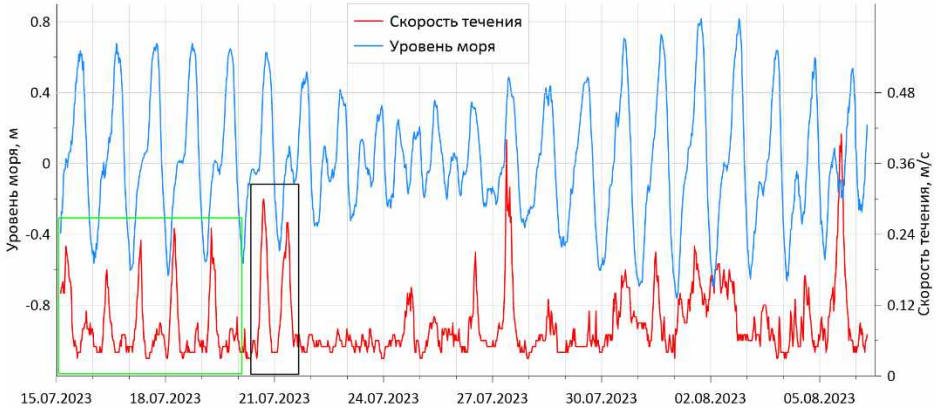


Рис. 8. *Уровень моря и скорость течения на станции 1 с 15 июля по 6 августа 2023 года. Зеленым прямоугольником обозначены колебания с суточной периодичностью, коричневым – колебания с периодом 16 ч*

Спектральный анализ скоростей течений на станции 1 выявил некоторые особенности (рис. 9). Колебания с периодами 11,9, 12,3, 24,2 и 26,1 ч связаны с приливными гармониками S2, M2, K1 и O1 соответственно. Самые большие амплитуды приливных колебаний течения относятся к двум последним гармоникам. Период колебаний 16,3 ч хорошо согласуется с инерционным периодом на этой широте. Колебания с периодами более 3 суток по всей видимости связаны с анемобарическими процессами – известно, что в районе пролива Лаперуза часто наблюдается прохождение глубоких циклонов с характерным периодом в 3–4 дня. Согласно данным метеостанции в г. Корсаков за период наблюдений проходило 3 циклона, при которых наблюдалось падение атмосферного давления на 15–20 гПа в течение 2–4 суток. С чем связан период колебаний около 20 часов пока остается непонятным.

© Мысленков С.А. и др., 2026

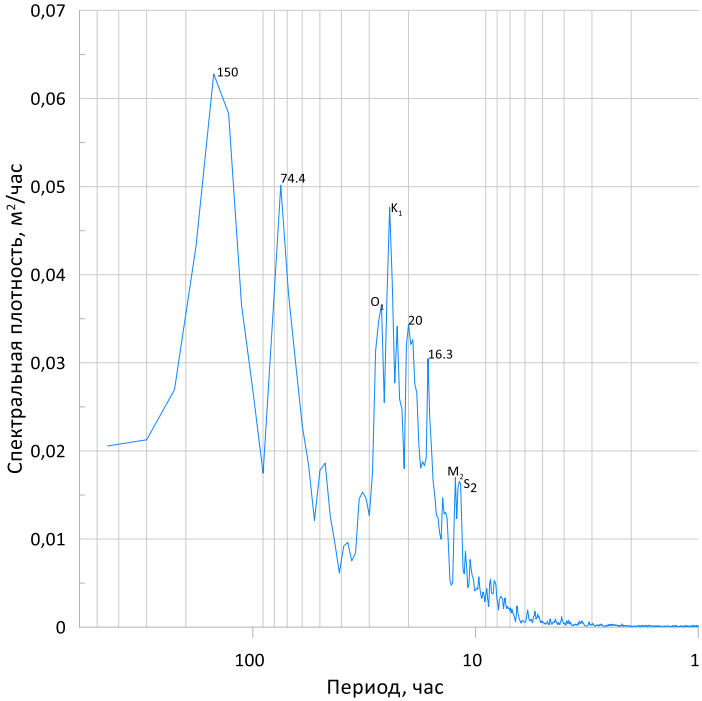


Рис. 9. *Спектральный анализ скорости течений на станции 1*

Далее рассмотрим пространственную структуру течений в период сизигии, когда наблюдался максимальный размах приливных колебаний. На рис. 10 представлена картосхема осреднённых по вертикали течений в заливе Анива на 1 августа 2023 г. в 17:00. В восточной части залива течения направлены преимущественно на северо-запад, в северной части поворачивают на юго-запад, формируя подобие циклонического движения (против часовой стрелки), охватывающего большую часть акватории. В центральной и северной частях залива скорости составляют 0,1–0,2 м/с. Максимальные значения (более 0,5 м/с) отмечаются в южных частях залива, в районе пролива Лаперуза и у мыса Анива. Также локальный максимум отмечается в районе бухты Лососей. Максимумы в южной части залива вероятно связаны с топографическим усилением, а локальный максимум в бухте Лососей связан с преобладающим направлением ветра и уменьшением глубины.

Полученные результаты в целом согласуются с ранее опубликованными работами [12, 13]. Однако, спектральный анализ течений (рис. 9) показал наличие пиков энергии на приливных периодах, помимо пика на инерционной

© Myslenkov S.A. et al., 2026

частоте. Визуально это отчетливо видно на рис. 8. Данный результат несколько отличается от представленного в работах [12, 13], что может быть связано с анализом в нашем случае данных в других точках и в другое время. Тем не менее регистрируемые колебания в скорости течений проявляются не всегда, что указывает на их сложную природу. В работе [14] высказана гипотеза о возникновении суточных колебаний течений в районе пролива Лаперуза под воздействием береговых захваченных волн. Однако, изучение этого вопроса потребует дополнительных численных расчетов и планируется в будущем.

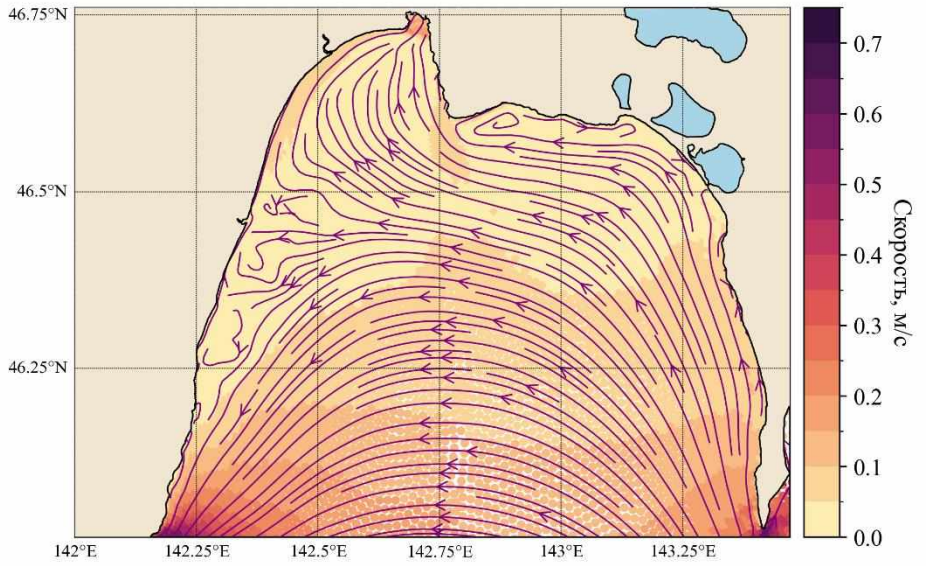


Рис.10. *Картосхема осреднённых по вертикали течений в заливе Анива на 1 августа 2023 г. в 17:00*

Заключение

На основе данных заякоренных инклинометров, оснащенных датчиками гидростатического давления, выполнены измерения уровня моря и придонных течений заливе Анива. Получены ряды данных на глубинах 10 и 15 м с интервалом 30 мин за период июнь–август 2023 года.

Анализ данных измерений показал, максимальных размах колебаний уровня моря составляет 1,59 м, а максимальная скорость течений составляет 0,41 м/с. Наиболее сильные течения имеют северо-западное направление.

Гармонический анализ данных измерений показал, что максимальный размах приливных колебаний уровня составляет около 1,5 м. Приливы имеют

© Мысленков С.А. и др., 2026

смешанный характер с преобладанием суточной составляющей. Доминируют суточные гармоники O1 и K1, а также полусуточная M2.

Выполнено сопоставление уровня моря с данными моделирования ADCIRC: коэффициент корреляции составляет 0,95, среднеквадратическая ошибка – 0,1 м. Сравнение гармонических постоянных по данным измерений с результатами моделирования показало хорошее согласие: отклонения амплитуд основных гармоник не превышают 0,01–0,02 м, фаз — 1–11°.

Показано, что в некоторые периоды четко выделяются максимумы течений (0,2–0,25 м/с), имеющие суточную периодичность и имеющие приливную природу, а также с периодом около 16 часов, соответствующих инерционному периоду. По результатам спектрального анализа в скорости течений наибольшую энергетику имеют колебания, соответствующие приливным гармоникам K_1 и O_1, а также инерционным колебаниям с периодом около 16,3 ч.

Пространственная структура течений в период сизигии характеризуется движением против часовой стрелки, охватывающей большую часть залива, Анива. В центральной и северной частях залива скорости составляют 0,1–0,2 м/с. Максимальные значения (более 0,5 м/с) отмечаются в южных частях залива, в районе пролива Лаперуза и у мыса Анива.

Литература

1. Аминина Н.М., Вишневская Т.И., Галанин Д.А. и др. Характеристика промысловых запасов Сахарины японской в заливе Анива (Охотское море) // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 116–123.
2. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site ‘Carbon-Sakhalin’ (Aniva bay, sea of Okhotsk) // Sustainability. 2024. V. 16. №.7. 3031.
3. Myslenkov S., Pishchalnik V., Arkhipkin V. et al. Physical Oceanography of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) // Pure Appl. Geophys. 2026. Vol. 183. P. 3821–3848.
4. Arkhipkin V. S., Ilyin V. I., Myslenkov S. A., Pishchalnik V. M., Latkovskaya E. M., Shumilov I. V., Romanyuk V. A., Pishchalnik A. V. Modeling of tides in the la Perouse strait using a high-resolution grid // Oceanology. 2026. V. 66, №. 3. P. 385–397.
5. Мысленков С.А., Пищальник В.М., Кондрашов А.А. и др. Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 1(395). С. 118–130.
6. Ковалев Д.П. Экспериментальные исследования явления тягуна в основных портах Сахалинской области // Мир транспорта. 2012. № 6. С. 36–43
7. Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П. Изучение опасных морских явлений в порту города Корсаков // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов: Сб. стат. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 138–145.
8. Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченир А., Куркин А. А., Москвитин А. А. Численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4. С. 396–406.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

9. Иванова А. А., Архипкин В. С., Мысленков С. А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 41–49.
10. Будаева В. Д., Макаров В. Г., Частиков В. Н. Результаты гидрологических исследований залива Анива в 2001–2003 гг. (структура и циркуляция вод) // Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2005. Т. 7. С. 83–110.
11. Никонов, Ю. Ю. Численное моделирование циркуляции вод в заливе Анива по данным океанографической съемки 26—31 мая 2004 года // Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2005. Т. 7. С. 245–254.
12. Шевченко Г.В., Частиков В.Н., Кириллов К.В., Кусайло О.В. Экспериментальные исследования течений в заливе Анива в 2003 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9(4). С. 35–46.
13. Шевченко Г. В., Кантаков Г. А., Частиков В. Н. Экспериментальные исследования течений в заливе Анива осенью 2002 года // Южно-Сахалинск: Труды СахНИРО. 2005. Т. 7. С. 224–244.
14. Odamaki M. Tides and tidal currents along the Okhotsk coast of Hokkaido // J. Oceanogr. 1994. V. 50, P. 265–279.
15. Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Подуфалов А.П., Облеухов С.Д., Голенко М.Н., Щука С.А. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. №2. С. 220–229.
16. Кондрашов А. А., Корж А. О. Обеспечение непрерывной продолжительной регистрации течений и волнения в море // XXIX Береговая конференция, Калининград, 18–24 апреля 2022 года.
17. Амбросимов А.К., Кондрашов А.А., Щука А.С. и др. О применении инклинометров при измерении течений в придонном слое и в толще моря // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 1. С. 187–204.
18. Luettich R. and Westerink J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. 2004. 74 pp.
19. Westerink J.J, Luettich R.A., Muccino J.C. Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids // Tellus. 1994. 46A. P. 178–199.
20. Blain C. A., Preller R. H., Rivera A. P. Tidal prediction using the advanced circulation model (ADCIRC) and a relocatable PC-based system //Oceanography. 2002. Vol. 15. №. 1. P. 77–87.
21. Joyce B.R., Pringle W.J., Wirasaet D., Westerink J.J., Van der Westhuysen A.J., Grumbine R., Feyen J. High resolution modeling of western Alaskan tides and storm surge under varying sea ice conditions // Ocean Modelling. 2019. V. 141. 101421.
22. Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate // Civil Engineering Journal. 2022. V. 8. No. 11. P. 2353–2377.
23. Pringle W.J., Wirasaet D., Roberts K.J., Westerink J.J. Global storm tide modeling with ADCIRC v55: unstructured mesh design and performance // Geoscientific Model Development. 2021. V. 14. P. 1125–1145.

© Мысленков С.А. и др., 2026

24. Ильин В.И., Архипкин В.С. Особенности приливного водообмена в Курильских проливах по данным моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2024. Т. 79. № 4. С. 44–54.
25. Lyard F., Allain D., Cancet M., Carrère L., Pico N. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance // Ocean Science, European Geosciences Union. 2021. V. 17. P. 615–649.
26. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049.
27. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод. // Перевод с англ. Краснопевцева А.Ю.; под ред. Шадрина И. Ф. Москва: Мир. 1988. 324 с.

References

1. Aminina, N.M., Vishnevskaya, T.I., Galanin, D.A. i dr. (2014). Harakteristika promyslovyh zapasov Sahariny yaponskoj v zalive Aniva (Ohotskoe more). *Izv. TINRO*, 178, 116–123.
2. Pishchalnik, V., Myslenkov, S., Latkovskaya, E., Arkhipkin, V. (2024). Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site ‘carbon-sakhalin’ (aniva bay, sea of Okhotsk). *Sustainability*, 16, 7, 3031.
3. Myslenkov, S., Pishchalnik, V., Arkhipkin, V. et al. (2026). Physical Oceanography of Aniva Bay (Sea of Okhotsk). *Pure Appl. Geophys*, https://doi.org/10.1007/s00024-026-04028-6
4. Arkhipkin, V. S., Ilyin, V. I., Myslenkov, S. A., Pishchalnik, V. M., Latkovskaya, E. M., Shumilov, I. V., Romanyuk, V. A., and Pishchalnik, A. V. (2026). Modeling of tides in the la Perouse strait using a high-resolution grid. *Oceanology*, 66, 3, 385–397.
5. Myslenkov, S.A., Pishchal'nik, V.M., Kondrashov, A.A. i dr. (2025).Analizizmerenijurovnyamoryaiparametrovvetrovogovolneniya v zaliveAniva (Ohotskoe more).*Gidrometeorologicheskie issledovaniya I prognozy*, 1(395), 118–130.
6. Kovalev, D.P. (2012).Eksperimental'nye issledovaniya yavleniya tyaguna v osnovnyh portah Sahalinskoj oblasti. *Mir transporta*, 6, 36–43.
7. Kovalev, P. D., Shevchenko, G. V., Kovalev, D. P. (2001). Izuchenie opasnyh morskih yavlenij. v portu goroda Korsakov. Dinamicheskie process na shel'fe Sahalina I Kuril'skih ostrovov: Sb. stat. – YUzhno-Sahalinsk, 138–145.
8. Zajcev, A. I., Pelinovskij, E. N., Dogan, D., YAlchenir, B., YAlchenir, A., Kurkin, A. A., Moskvitin, A. A. (2019). CHislennoe modelirovanie shtormovogo nagona 15 noyabrya 2019 goda na yuge ostrova Sahalin. *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 36, 4, 396–406.
9. Ivanova, A. A., Arhipkin, V. S., Myslenkov, S. A., Shevchenko, G.V. (2015). Modelirovanie shtormovyh nagonov v pribrezhnoj zone o. Sahalin. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 3, 41–49.
10. Budaeva, V. D., Makarov, V. G., CHastikov, V. N. (2005). Rezul'taty gidrologicheskih issledovanij zaliva Aniva v 2001-2003 gg. (struktura I cirkulyaciya vod). *Trudy Sahalinskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozyajstva I okeanografii*, 7, 83–110.
11. Nikonov, YU. YU. (2005). CHislennoe modelirovanie cirkulyacii vod v zaliveAniva po dannym okeanograficheskoj s"emki 26—31 maya 2004 goda. *Trudy Sahalinskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozyajstva I okeanografii*, 7, 245–254.
12. Shevchenko, G.V., CHastikov, V.N., Kirillov, K.V., Kusajlo, O.V. (2016).

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Eksperimental'nye issledovaniya techenij v zalive Aniva v 2003 g. *Fundamental'naya I prikladnaya gidrofizika*, 9(4), 35–46.
13. Shevchenko, G. V., Kantakov, G. A., CHastikov, V. N. (2005).Eksperimental'nye issledovaniya techenij v zalive Aniva osen'yu 2002 goda. *Trudy SahNIRO*, 7, 224–244.
14. Odamaki, M. Tides and tidal currents along the Okhotsk coast of Hokkaido. J Oceanogr 50, 265–279 (1994).
15. Paka V.T., Nabatov V.N., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Podufalov A.P., Obleuhov S.D., Golenko M.N., SHCHuka S.A. (2019) Ob usovershenstvovanii inklinometricheskogo izmeritelya skorosti pridonnyh techenij // Okeanologicheskie issledovaniya, 47, 2, 220–229.
16. Kondrashov, A. A., Korzh, A. O. Obespechenie nepreryvnoj prodolzhitel'noj registracii techenij i volneniya v more // XXIX Beregovaya konferenciya, Kaliningrad, 18–24 aprelya 2022 goda.
17. Ambrosimov, A.K., Kondrashov, A.A., SHCHuka, A.S. i dr. (2025). O primenenii inklinometrov pri izmerenii techenij v pridonnom sloe i v tolshchemorya. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 53, 1, 187–204.
18. Luettich, R., Westerink, J. (2004). Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX, 74.
19. Westerink, J.J, Luettich, R.A., Muccino, J.C. (1994). Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids. *Tellus*, 46, 178–199.
20. Blain, C. A., Preller, R. H., Rivera, A. P. (2002). Tidal prediction using the advanced circulation model (ADCIRC) and a relocatable PC-based system. *Oceanography*, 15, 1, 77–87.
21. Joyce, B.R., Pringle, W.J., Wirasaet, D., Westerink, J.J., Van der Westhuysen A.J., Grumbine, R., Feyen, J. (2019). High resolution modeling of western Alaskan tides and storm surge under varying sea ice conditions. *Ocean Modelling*, 141, 101421.
22. Pavlova, A., Myslenkov, S., Arkhipkin, V., Surkova, G. (2022). Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate. *Civil Engineering Journal*, 8, 11, 2353–2377.
23. Pringle, W.J., Wirasaet, D., Roberts, K.J., Westerink, J.J. (2021). Global storm tide modeling with ADCIRC v55: unstructured mesh design and performance. *Geoscientific Model Development*, 14, 1125–1145.
24. Il'in, V.I., Arhipkin, V.S. (2024). Osobennosti prilivnogo vodoobmena v Kuril'skih prolivah po dannym modelirovaniya. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 79, 4, 44–54.
25. Lyard, F., Allain, D., Cancet, M., Carrère, L., Pico, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science*, 17, 615–649.
26. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 730, 1999–2049.
27. Bouden, K. Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnyh vod. // Perevod s angl. Krasnopevceva A.YU.; pod red. SHadrina I. F. Moskva: Mir. 1988. 324 s.

© Мысленков С.А. и др., 2026

УДК 581.132.1
DOI: 10.7868/S2658670326030054

Сезонные оценки первичной продукции на карбоновом полигоне в северо-восточной части Черного моря

Мошаров Сергей Александрович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-0055-8982; e-mail: sampost@list.ru

Федоров Алексей Владимирович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-4673-6649; e-mail:aleksey_fedorov_199001@mail.ru

Ребецкая Елена Анатольевна
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0009-0003-8222-0321; e-mail: marmarit@yandex.ru

Аннотация. Первичная продукция является первым звеном потока углерода в морской экосистеме за счет «биологического насоса». В северо-восточной части Черного моря на Геленджикском карбоновом полигоне выполнены исследования сезонной изменчивости первичной продукции на фоне структурных изменений фитоценоза. Благодаря сочетанию двух методов (классический радиоуглеродный и современный флуоресцентный) оценки первичной продукции в разные сезоны в течение 2025 года были выполнены с высоким временным разрешением. Получены количественные характеристики первичной продукции для разных сезонов. Проведено исследование влияния доминирующих таксономических групп фитопланктона на уровень первичной продукции в каждом сезоне.

Ключевые слова: первичная продукция, активная флуоресценция хлорофилла, фитопланктон, карбоновый полигон, Черное море

Благодарности. *Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2026-0001*

Для цитирования: Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А. Сезонные оценки первичной продукции на карбоновом полигоне в северо-восточной части Черного моря // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 73–84. DOI: 10.7868/S2658670326030054

Дата поступления в редакцию: 11.05.2026
Дата принятия к публикации: 12.09.2026

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026

UDC 581.132.1
DOI: 10.7868/S2658670326030054

Seasonal estimates of primary productivity at the carbon supersite in the northeastern Black Sea

Sergey A. Mosharov
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-0055-8982; e-mail: sampost@list.ru

Alexey V. Fedorov
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-4673-6649; e-mail:aleksey_fedorov_199001@mail.ru

Elena A. Rebetskaya
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0003-8222-0321; e-mail: marmarit@yandex.ru

Abstract. Primary production is the first link in the flow of carbon in the marine ecosystem due to the "biological pump". In the north-eastern part of the Black Sea at the Gelendzhik carbon supersite, studies of seasonal variability of primary production against the background of structural changes in the phytocenos is were carried out. By combining two methods (classical ^{14}C-uptake and modern fluorescence), estimates of primary production in different seasons during 2025 were made with high temporal resolution. Quantitative characteristics of primary production for different seasons were obtained. A study was conducted of the influence of the dominant taxonomic groups of phytoplankton on the level of primary production in each season.

Keywords: primary production, active chlorophyll fluorescence, phytoplankton, carbon polygon, Black Sea

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of state assignment No. FMWE-2026-0001

For citation: Mosharov S.A., Fedorov A.V., Rebetskaya E.A. (2026). Seasonal estimates of primary productivity at the carbon supersite in the northeastern Black Sea. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3,* 73–84. doi: 10.7868/S2658670326030054 (in Russ.).

Received: 11.05.2026
Accepted: 12.09.2026

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

Введение

Первичная продукция – первый этап формирования взвешенного органического вещества в водной среде. Это вещество служит пищей для водных организмов. В процессе их жизнедеятельности формируется поток углерода из верхних слоев водной толщи в глубины, где происходит накопление взвешенного углерода. Деятельность планктонного сообщества обеспечивает функционирование «биологического насоса», удаляющего атмосферный CO_2 в море. Климатическая роль фотосинтетической активности фитопланктона рассматривается в контексте исследований формирования и сезонной изменчивости потоков углерода на карбоновом полигоне [1]. Первичная продукция является первым звеном потока углерода в морской экосистеме за счет «биологического насоса».

Величина первичной продукции значительно варьирует в течение года. Сезонность первичной продуктивности обусловлена изменениями состояния фитопланктона (видовая структура, физиологическая активность), гидрохимических и гидрологических условий [2]. Виды-доминанты в фитопланктоне, очевидно, определяют уровень и динамику величин первичной продукции. При этом критерием доминирования используется биомасса микроводорослей.

Как показали исследования в северо-восточной части Черного моря [3–6], мелкоклеточные диатомеи являются основными доминирующими видами весной, в мае и июне часто преобладают по численности кокколитофориды. В отдельных случаях отмечался значительный вклад динофлагеллят [5]. В летне-осенний период доминируют крупноклеточные формы диатомовых водорослей *Proboscia alata* и *Pseudosolenia calcar-avis*. Роль микроводорослей других системных групп обычно незначительна. Различные таксономические группы фитопланктона северо-восточной части Черного моря по-разному адаптированы к сезонным изменениям световых условий, а у отдельных видов отмечены и вовсе уникальные механизмы приспособления как слабой, так и экстремально высокой облученности, что в свою очередь может сказываться на удельной эффективности фотосинтеза в различные сезоны [7, 8].

1. Материалы и методы

Исследования были выполнены на территории морской части карбонового полигона «Геленджик» – в Голубой бухте (Геленджикский район, Краснодарский край) (рис. 1). Пробы воды были собраны с пирса в 100 м от берега из поверхностного слоя 0–0,5 м (ведром) с периодичностью 2–3 дня в период с 6 января по 8 октября 2025 г. Пробы в течение 20 мин были перенесены в лабораторию для проведения измерений активной флуоресценции и скорости первичной продукции.

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026



Рис. 1. Район исследований и расположение точки отбора проб

Оценка скорости первичной продукции (PP) проводится двумя основными методами – радиоуглеродный и флуоресцентный [9]. Радиоуглеродный инкубационный метод позволяет определить скорость фотосинтетического образования органического углерода за определенный период. Однако этот метод трудозатратный, требует время на инкубацию проб в искусственно созданных условиях. Для этого нужны специальное оборудование и высококвалифицированные специалисты, что сложно обеспечить для непрерывных измерений первичной продукции в течение года. Измерение активной флуоресценции хлорофилла позволяет определить «мгновенную» скорость накопления световой энергии как потенциал для синтеза органического

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

вещества. Этот метод не требует инкубирования проб в определенных условиях и прост в исполнении на этапе измерений параметров и накопления результатов. Особенности метода активной флуоресценции с использованием высокочувствительного флуориметра WATER-PAM-II позволяют проводить измерения продукционных параметров с высоким временным разрешением в течение года. Для расчета количества синтезированного органического углерода по результатам измерений активной флуоресценции хлорофилла необходимо использовать коэффициент фотосинтетической эффективности, определяемый при параллельном измерении двумя методами как минимум для каждого сезона. Одновременные измерения скорости первичной продукции с помощью радиоуглеродного инкубационного метода и флуоресцентные измерения были выполнены в подпробах из одной пробы. Такие синхронные измерения проводились в апреле, июне и октябре. Такая синхронизация важна для расчета достоверных переводных коэффициентов, так как позволяет соотнести флуоресцентный сигнал именно с той фотосинтетической активностью, которая фиксировалась радиоуглеродным методом в конкретный момент времени, без временного сдвига.

Для учета численности и биомассы фитопланктона и определения его таксономического состава концентрирование проб проводилось методом обратной фильтрации [10]. Идентификация видов и подсчет числа клеток проводились на световом микроскопе в счетных камерах Ножотта объемом 0,05 мл для нанопланктона и Наумана объемом 1,0 мл для микропланктона. При расчете биомассы применен метод «истинного объема» [11], биомасса выражена в единицах сырой биомассы (мг/м^3). Идентификация видов проводилась с помощью Identifying Marine Phytoplankton [12] и электронных ресурсов www.algaebase.org и www.marinespecies.org.

2. Результаты и обсуждение

За период с 6 января по 8 октября 2025 г. было выполнено 117 измерений параметров активной флуоресценции хлорофилла фитопланктона в пробах воды, собранных в Голубой бухте на дальней точке пирса (100 м от берега). Таким образом, исследованиями были охвачены все сезоны: зимний, весенний, летний и осенний.

Критерием выделения биологических сезонов были выбраны даты появления в фитопланктоне доминирующих видов и достижения ими высокой относительной биомассы (как доля от общей биомассы фитопланктона). Дополнительно к этому выделен один сезон, а именно период конца весны – начала лета (вторая половина мая и первая половина июня), который характеризуется резким изменением структуры фитопланктонного сообщества из-за смены доминирующих видов. На смену диатомовым водорослям приходят кокколитофориды.

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026

Температура воды на поверхности варьировала от 7,4 до 12,1 °С в январе-марте, постепенно увеличивалась до 26,7°С в период сначала апреля до середины июля и держалась на уровне выше 25 °С до начала сентября. В сентябре-октябре поверхностная температура воды постепенно снижалась до 18 °С.

Основой для понимания сезонной динамики первичной продукции являются данные о биомассе фитопланктона. Биомасса выступает интегральной характеристикой функционального состояния фитопланктона, определяющей, наряду с уровнем его активности, масштаб фотосинтетической фиксации углерода – ключевого процесса, изучаемого на карбоновом полигоне.

Биомасса фитопланктона в поверхностном слое воды в период с 6 января по 8 октября 2025 г. варьировала от 25 до 1895 мг/м^3 (рис. 1). В сезонном аспекте высокие значения общей биомассы были в периоды с 23 июня по 16 июля (345–742 мг/м^3) и с 25 июля по 20 августа (479–1895 мг/м^3). С 20 по 23 июня увеличение биомассы было значительным – с 119 до 748 мг/м^3 (рис. 2). Второй пик биомассы формировался более медленно (7 дней), но достигал больших величин – до 1085 мг/м^3 (рис. 2). Третий (осенний) период высокой биомассы был с 17 сентября по 6 октября (максимальные значения 1180 мг/м^3 наблюдали 1 октября) (рис. 2). При этом в промежутке между вторым летним и осенним периодами биомасса фитопланктона была низкой – в среднем 153±69 мг/м^3. В зимний период (январь–февраль) биомасса фитопланктона в среднем была на уровне 132±76 мг/м^3 (рис. 2).

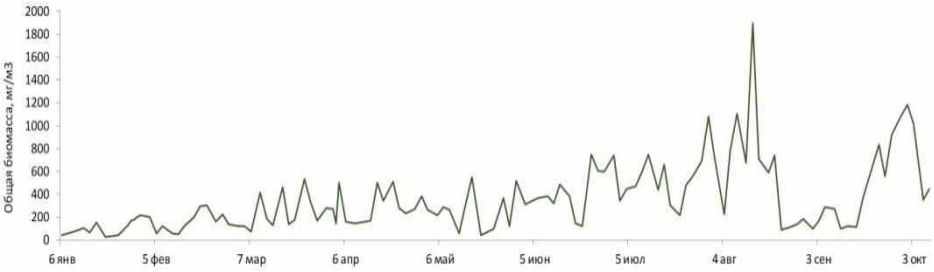


***Рис. 2**. Годовая динамика общей биомассы фитопланктона в Голубой бухте в 2025 г*

Основной вклад в общую биомассу фитопланктона обеспечивали диатомовые водоросли (рис. 3). В среднем за период исследований доля диатомовых составляла 66±25%, доля динофлагеллят – 19±17%, доля кокколитофорид – 12±15%. Максимальное доминирование диатомовых по биомассе (более 80%) было в зимне–весенний период с 19 февраля по 2 апреля и в летне-осенний период с 28 июля по 8 октября. В весенне-летний период с 4 апреля по 2 июля доля других групп водорослей возрастала до значимых уровней (15–60%), что обеспечивало большее разнообразие фитопланктона.

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

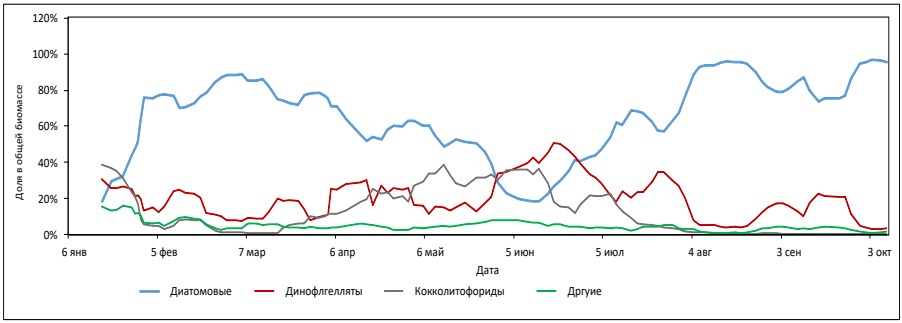


***Рис. 3**. Годовая динамика значений доли групп фитопланктона в общей биомассе*

Величина rETR (при ФАР=90 мкЕ), являющаяся мерой первичной продукции по флуоресцентным показателям, за весь период исследований варьировала от 9,3 до 20,3 отн. ед., в среднем составляя 16,2±2,2 отн. ед.В целом можно выделить три этапа в годовой динамике этого параметра: высокие значения в зимний период, умеренные значения весенне-летний период и вновь высокие значения в конце лета-начале осени (рис. 4).

В период с 17 января по 3 марта величина rETR была на высоком уровне (в среднем 17,8±1,6 отн. ед.). 7 марта было установлено резкое снижение этого параметра до 11 отн. ед., отражая значительное понижение продукционной способности фитопланктона в эту дату. В последующие 16 дней происходило постепенное увеличение продукционной способности до 18 отн. ед. 21 марта. Затем произошло снижение. В весенне-летнем периоде (с 26 марта по 14 июля) значения rETR существенно варьировали от 9,3 до 16,9 отн. ед., в среднем составляя 14,8±1,9 отн. ед. Небольшое увеличение уровня rETR было 18 июля (до 18,6 отн. ед.). В летне-осенний период (18 июля – 8 октября) средний уровень rETR составлял 17,2±1,9 отн. ед.

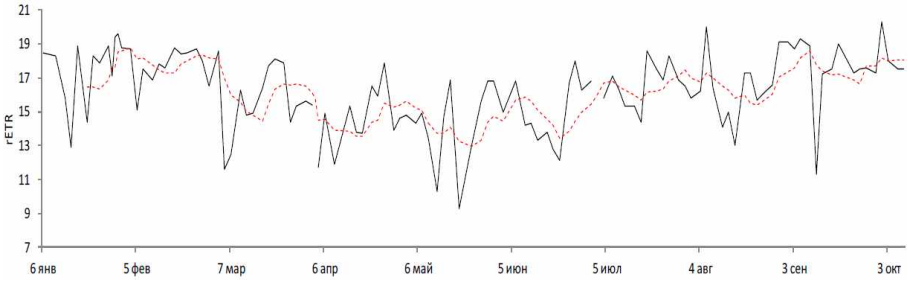


***Рис. 4.** Годовая динамика относительной скорости электронного транспорта (rETR), являющейся мерой первичной продукции, (сплошная линия). Пунктирная линия показывает сглаживание по 5-ти ближайшим точкам*

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026

Параллельные измерения продукционных параметров (первичная продукция и rETR) были выполнены для определения коэффициента фотосинтетической эффективности PP/rETR в разные сезоны – весенний (апрель), летний (июнь) и осенний (октябрь). Результаты измерений представлены в табл. 1.

В апреле величина суточной PP фитопланктона в Голубой бухте была минимальной (5,1 мгС/м^3 в сут). В летний сезон PP варьировала от 33 до 80 мгС/м^3 в сут, в среднем составляя 56 мгС/м^3 в сут.В осенний период первичная продукция снизилась почти в два раза, но оставалась на значительном уровне.

Фотосинтетическая эффективность (PP/rETR) в летний период варьировала от 0,649 до 1,692, составляя в среднем 1,069±0,547 (табл. 1). В Весенний период эта величина была в 7 раз ниже, а в осенний период – в 1,9 раза ниже. Эффективность использования накопленной в фотосистеме световой энергии в процессах синтеза органического вещества существенно различалась в разные сезоны, что может быть связано с разными уровнями основных экологических факторов (в первую очередь температуры воды), а также разной физиологической активностью фитопланктона.

Таблица 1.*Сезонная изменчивость поверхностных величин первичной продукции (PP), относительной скорости электронного транспорта (rETR) и фотосинтетической эффективности (PP/rETR) в Голубой бухте (дальняя точка пирса)*

Дата	PP, мгС/м^3 в сут	rETR	PP/rETR
3 апреля	5,1	34,6	0,147
10 июня	80	47,28	1,692
14 июня	37	56,98	0,649
17 июня	33	41,85	0,836
30 октября	24	43,14	0,556

Полученные сезонные значения коэффициента PP/rETR и динамика величин rETR в течение года (рис. 4, табл. 1) были использованы для оценки годовой динамики первичной продукции. Результаты представлены на рис. 5.

Как видно из рисунка, ПП была минимальной зимой и в начале весны, в среднем составляя 7,11±0,65 мгС/м^3 в сут. Во второй половине весны происходило постепенное увеличение ПП до уровня 40–50 мгС/м^3 в сут (в среднем 47,14±5,18 мгС/м^3 в сут), на котором она и сохранялась в течение всего лета. Затем наблюдалось снижение ПП в начале осени до уровня 27,49±3,09 мгС/м^3 в сут.

Сопоставление годовой динамики ПП и общей биомассы фитопланктона показывает отсутствие какой-либо существенной связи между этими параметрами (r=0,50, p<0,05). Хотя в целом очевидно, что летний сезон с высокой ПП характеризовался более высокой общей биомассой фитопланктона

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

по сравнению с другими сезонами. В зимний период общая биомасса в среднем составляла 181±91 мг/м^3, во второй половине лета – в среднем 511±240 мг/м^3.

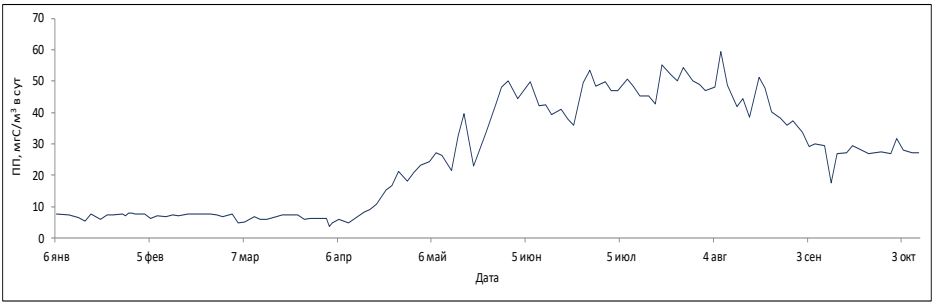


Рис. 5. *Оценка годовой динамики первичной продукции в Голубой бухте*

Снижение доли диатомовых в общей биомассе фитопланктона в весенний период было тесно связано с постепенным увеличением ПП в этот период (рис. 6). Для данного периода между этими параметрами установлена сильная отрицательная корреляция (r= – 0.83, p<0.05).

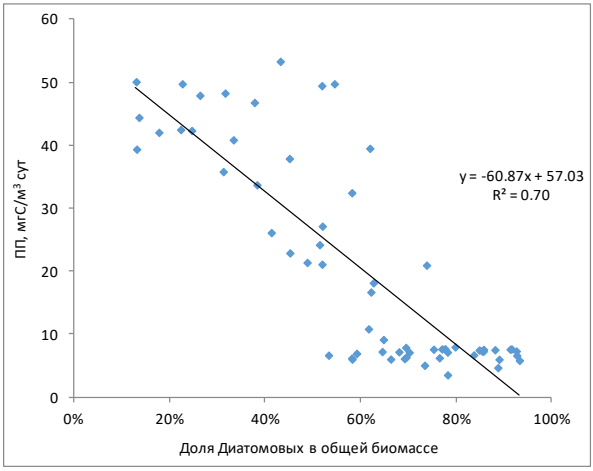


Рис. 6. *Соотношение между величиной доли диатомовых в общей биомассе фитопланктона и первичной продукцией в период с февраля по июнь*

Начало подъема уровня ПП в середине весны (с 10 апреля) было сопряжено с увеличением разнообразия фитопланктонного сообщества – роль диатомовых, доминировавших в конце зимы-начале весны (до 80% в общей

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026

биомассе), снижалась до 40%. При этом возрастало присутствие других групп фитопланктона (динофлагеллят и кокколитофорид) (рис. 3). При максимальном уровне первичной продуктивности в первой половине лета состав фитопланктона кардинально изменился. Доминирующими группами на короткий период в это время становились динофлагелляты (до 44%) и кокколитофориды (до 57%). Во второй половине лета и в начале осени повышенный уровень ПП соответствовал доминированию диатомовых (более 80% общей биомассы).

Ранее нами было показано, что потенциальная способность к фотосинтезу при оптимальных условиях (Fv/Fm), характеризующая «здоровье» фитопланктона, в Голубой бухте была низкой весной и высокой с конца весны до конца лета [13].

Заключение

В результате исследования установлено, что оценочная годовая динамика первичной продукции в поверхностном слое на Геленджикском карбоновом полигоне в Голубой бухте (северо-восточная часть Черного моря) характеризуется низким уровнем в зимне-весенний период, высокими значениями в летний период и умеренными значениями в осенний период. Увеличение значений первичной продукции в весенний период было сопряжено с уменьшением доминирования диатомовых в фитопланктонном сообществе и, соответственно с увеличением доли динофитовых водорослей и кокколитофорид. Во второй половине лета и осенью высокий уровень первичной продукции, наоборот, был обусловлен доминированием диатомовых, которые и обеспечивали высокую продуктивность. Таким образом, роль разных групп фитопланктона в формировании первого звена потока углерода в морской экосистеме за счет «биологического насоса» меняется в разные сезоны.

Литература

1. Laws E.A., Maiti K. The relationship between primary production and export production in the ocean: Effects of time lags and temporal variability // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2019. Vol. 148. P. 100–107. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.05.006.
2. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic photosynthesis. 2nd ed. Princeton University Press, UK, Princeton, 2007. 476 pp.
3. Лифанчук А.В., Федоров А.В. Смена экологических стратегий в фитопланктонном сообществе северо-восточной части Черного моря в течение годового цикла // Экология гидросферы. 2018. №1(2). URL: http://hydrosphere-ecology.ru/99
4. Silkin V.A., Pautova L.A., Giordano M., Chasovnikov V.K., Vostokov S.V., Podymov O.I., Pakhomova S.V., Moskalenko L.V. Drivers of phytoplankton bloomsin then or the a stern Black Sea // Mar. Poll. Bull.2019.Vol. 138. P. 274–284. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.042

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

5. Ясакова О.Н., Макаревич П.Р. Современное состояние фитопланктона северо-восточной части Черного моря: [монография]/отв. ред. акад. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2023. 232 с. ISBN 978-5-4358-0247-4.
6. Федоров А.В., Федорова П.А., Хоменко С.А., Ключанцева А.П. Динамика фитопланктона в Голубой бухте (г. Геленджик) в 2024 году // Водные биоресурсы и среда обитания. 2025. Т. 8 (4). С. 88–103. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_4_88
7. Федоров А.В., Парамонов Л.Е., Силкин В.А. Роль формы клетки диатомовых в конкуренции за энергию света // Вопросы современной альгологии. 2019. № 3 (21). С. 37–47. URL: http://algology.ru/1568
8. Silkin V.A., Fedorov A.V., Flynn K.J., Paramonov L.E., Pautova L.A. Protoplasmic streaming of chloroplasts enables rapid photoacclimation in large diatoms // J. Plankton Res. 2021. Vol. 43 (6). P. 831–845. https://doi.org/10.1093/plankt/fbab071
9. Мошаров С.А., Ребецкая Е.А. Развитие флуоресцентного экспресс-метода оценки первичной продукции фитопланктона как начального звена потока углерода на карбоновом полигоне «Геленджик» // Экология гидросферы. 2024. №2 (12). С. 111–118. URL: http://hydrosphere-ecology.ru/429. https://doi.org/10.33624/2587-9367-2023-2(10)-111-118. EDN: EEAJWU.
10. Суханова И.Н. Концентрирование фитопланктона в пробе / Виноградов М.Е. (ред.). Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. М.: Наука, 1983. С. 97–105.
11. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.:Наука, 1969. Т. 1. 657 с.
12. Identifying Marine Phytoplankton / Tomas C.R. (Ed.). San-Diego: Academic Press, 1997. 858 pp.
13. Мошаров С.А., Федоров А.В., Сашова О.А., Даллакян Г.А., Мошарова И.В. Сезонная динамика флуоресцентных параметров первичной продуктивности как начального этапа потока углерода на Геленджикском карбоновом полигоне в Черном море // Экологические системы и приборы. 2025. № 12. С. 56–66. https://doi.org/10.25791/esip.12.2025.1565.

References

1. Laws E.A., Maiti K. (2019). The relationship between primary production and export production in the ocean: Effects of time lags and temporal variability. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 148, 100–107. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.05.006.
2. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic photosynthesis. 2nd ed. Princeton University Press, UK, Princeton, 2007. 476 pp.
3. Lifanchuk A.V., Fedorov A.V. (2018). Change of ecological strategies in the phytoplankton community of the north-eastern Black Sea during the annual cycle. *Ecology of the hydrosphere*. 1(2). (in Russ.). URL: http://hydrosphere-ecology.ru/99.
4. Silkin V.A., Pautova L.A., Giordano M., Chasovnikov V.K., Vostokov S.V., Podymov O.I., Pakhomova S.V., Moskalenko L.V. (2019). Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea. *Mar. Poll. Bull.*, 138, 274-284. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.042

© Mosharov S.A., Fedorov A.V., & Rebetskaya E.A., 2026

5. Yasakova O.N., Makarevich P.R. Current State of Phytoplankton in the Northeastern Black Sea: [Monograph] / Ed.by Academician G.G.Matishov. Rostov-on-Don: SSC RAS Press, 2023. 232 p.(in Russ.).
6. Fedorov A.V., Fedorova P.A., Khomenko S.A., Klyuchantseva A.P. (2025). Phytoplankton dynamics in Golubaya Bay (Gelendzhik) in 2024. *Aquatic Bioresources and Environment*, 8 (4), 88–103. (in Russ.). https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_4_88.
7. Fedorov A.V., Paramonov L.E., Silkin V.A. (2019). The role of diatom cell shape in competition for light energy. *Issues of Modern Phycology*, 3 (21),37–47. (in Russ.). URL: http://algology.ru/1568
8. Silkin V.A., Fedorov A.V., Flynn K.J.,Paramonov L.E.,Pautova L.A. (2021). Protoplasmic streaming of chloroplasts enables rapid photoacclimation in large diatoms.*J. Plankton Res*., 43 (6),831–845. https://doi.org/10.1093/plankt/fbab071
9. Mosharov S.A., Rebetskaya E.A. (2024). Development of a fluorescent express method for assessing the primary production of phytoplankton as the initial link in the carbon flow at the Gelendzhik carbon test site.*Ecology of the hydrosphere*, 2 (12), 111–118. (in Russ.). URL: http://hydrosphere-ecology.ru/429. https://doi.org/10.33624/2587-9367-2023-2(10)-111-118. EDN: EEAJWU.
10. Sukhanova I.N. Phytoplankton concentration in a sample/ Vinogradov M.E. (ed.). Modern methods of quantitative assessment of marine plankton distribution. Moscow: Nauka, 1983. pp. 97–105.(in Russ.).
11. Kiselev I.A. Plankton of the seas and continental waters. Leningrad: Nauka, 1969. Vol. 1. 657 p.(in Russ.).
12. Identifying Marine Phytoplankton / Tomas C.R. (Ed.). San-Diego: Academic Press, 1997. 858 pp.
13. Mosharov S.A., Fedorov A.V., Sashova O.A., Dallakyan G.A., Mosharova I.V. (2025). Seasonal dynamics of fluorescent parameters of primary productivity as the initial stage of carbon flux at the Gelendzhik carbon polygon in the Black Sea. *Ecological systems and devices*, 12, 56–66.(in Russ.). https://doi.org/10.25791/esip.12.2025.1565.

© Мошаров С.А., Федоров А.В., Ребецкая Е.А., 2026

УДК 551.466, 551.559
DOI: 10.7868/S2658670326030066

Сезонная изменчивость накопления макрофитов в прибрежной зоне залива Анива

Никулина Ирина Владимировна
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Шумилов Илья Валерьевич
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

Мысленков Станислав Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Латковская Елена Максимовна
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Пищальник Владимир Михайлович
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Романюк Валерий Анатольевич
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Зарубина Дарья Васильевна
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Антонов Юрий Анатольевич
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0009-0006-3865-3113; e-mail: yuriy-antonov-2000@mail.ru

Аннотация. Ежегодно под действием биологических и гидрометеорологических факторов на побережье зал. Анива формируются скопления макрофитов (водорослей и морских трав). В работе исследована сезонная изменчивость

© Nikulina I.V. et. al., 2026

штормовых выбросов макрофитов на трёх участках северного побережья зал. Анива (Третья Падь, Нечаевка и Пригородное) по данным наблюдений 2025–2026 гг. Частоту появления свежих выбросов регистрировали с часовой дискретностью с помощью фотоловушек, оснащённых GSM-модулем. Площадь береговых скоплений оценивали по данным маршрутной наземной фотосъёмки; изображения обрабатывали методом семантической сегментации с использованием свёрточной нейронной сети U-Net. В пределах наблюдавшегося годового цикла выделены четыре периода сезонной динамики. В марте–августе регистрировали 2–3 выброса в месяц, в сентябре–октябре – до 7 событий в месяц; зимой частота резко снижалась, вплоть до отсутствия выбросов в отдельные месяцы. По результатам четырёх маршрутных съёмок 2025 г. суммарная оценочная площадь скоплений на трёх обследованных участках составила 6,4 тыс. м² в июне, 14,0 тыс. м² в августе, 24,0 тыс. м² в октябре и 8,6 тыс. м² в ноябре. Влажность биомассы варьировала от 50,0 до 85,8%. Среднее отношение C/N увеличилось от 10,6 ± 1,1 в августе до 16,7 ± 2,4 в ноябре при общем диапазоне 9,6–20,0, что может указывать на снижение потенциальной разлагаемости органического вещества к концу осени. Полученные данные позволяют предполагать сезонную изменчивость эмиссионного потенциала CO_2 и его более высокие значения в августе по сравнению с октябрём и ноябрём. Береговые скопления макрофитов могут служить косвенным индикатором состояния прибрежных макрофитных сообществ, а разработанный подход может использоваться для регулярного мониторинга их сезонной динамики.

Ключевые слова: макрофиты, штормовые выбросы, фотоловушки, семантическая сегментация, эмиссионный потенциал CO_2, залив Анива, Охотское море

Благодарности. Анализ данных и расчеты выполнены Никулиной И.В., Шумиловым И.В., Пищальником В.М. в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2024-0002). Лабораторные анализы проб выполнены Латковской Е.М. и Антоновым Ю.А. в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета (FEFF-2024-0004) «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий».

Для цитирования: Никулина И.В., Шумилов И.В., Мысленков С.А., Латковская Е.М., Пищальник В.М., Романюк В.А., Зарубина Д.В., Антонов Ю.А. Сезонная изменчивость накопления макрофитов в прибрежной зоне зал. Анива // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 85–104. DOI: 10.7868/S2658670326030066

Дата поступления в редакцию: 06.06.2026
Дата принятия к публикации: 03.09.2026

© Никулина И.В. и др., 2026

UDC 551.466, 551.559
DOI: 10.7868/S2658670326030066

Seasonal variability of macrophyte accumulation in the coastal zone of Aniva Bay

Irina V. Nikulina
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0001-4926-7027; e-mail: i.nikulina@imgg.ru

Ilya V. Shumilov
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-6713-779X; e-mail: i.shumilov@imgg.ru

Stanislav A. Myslenkov
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Elena M. Latkovskaya
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-1198-0038; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Vladimir M. Pishchalnik
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0003-1432-6741; e-mail: v.pishchalnik@imgg.ru

Valery A. Romanyuk
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Daria V. Zarubina
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0003-9615-4951; e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

Yuri A. Antonov
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0009-0006-3865-3113; e-mail: yuriy-antonov-2000@mail.ru

© Nikulina I.V. et. al., 2026

Abstract. Macrophyte accumulations (macroalgae and seagrasses) form annually along the coast of Aniva Bay under the influence of biological and hydrometeorological factors. This study investigates the seasonal variability of storm-driven macrophyte wrack at three sites along the northern coast of Aniva Bay (Tretya Pad, Nechaevka, and Prigorodnoye) based on observations conducted in 2025–2026. The occurrence of fresh wrack events was recorded hourly using camera traps equipped with GSM modules. The area of coastal wrack accumulations was estimated from ground-based photographic surveys conducted along predefined shoreline routes; the images were processed by semantic segmentation using a U-Net convolutional neural network. Four seasonal phases were identified within the observed annual cycle. From March to August, 2–3 wrack events per month were recorded, while in September–October their frequency increased to as many as seven events per month; in winter, the frequency declined sharply, with no wrack events recorded in some months. Based on four ground-based photographic surveys conducted in 2025, the estimated total area of wrack accumulations across the three surveyed sites was 6.4×10^3 m² in June, 14.0×10^3 m² in August, 24.0×10^3 m² in October, and 8.6×10^3 m² in November. Biomass moisture content ranged from 50.0 to 85.8%. The mean C/N ratio increased from 10.6 ± 1.1 in August to 16.7 ± 2.4 in November, with an overall range of 9.6–20.0, which may indicate a reduced potential for organic matter decomposition toward late autumn. The results suggest seasonal variability in CO_2 emission potential, with higher values in August than in October and November. Coastal macrophyte wrack accumulations may serve as an indirect indicator of the condition of coastal macrophyte communities, while the developed approach can be used for regular monitoring of their seasonal dynamics.

Keywords: macrophytes, storm wrack, camera traps, semantic segmentation, CO_2 emissionpotential, Aniva Bay, Sea of Okhotsk

Acknowledgments. Data analysis and calculations were carried out by I.V. Nikulina, I.V. Shumilov, V.M. Pishchalnik within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002). Laboratory analyses were performed by E.M. Latkovskaya and Yu.A. Antonov within the framework of the state assignment of Sakhalin State University (FEFF-2024-0004), “Development of Scientific Foundations for Managing Carbon Uptake and Accumulation Processes in Biomorpholithosystems of Coastal and Marine Wetlands and Adjacent Marine Areas.”

For citation: Nikulina, I.V., Shumilov I.V., Myslenkov S.A., Latkovskaya E.M., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Zarubina D.V., Antonov Yu.A. (2026). Seasonal variability of macrophyte accumulation in the coastal zone of Aniva Bay. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3*, 85–104. doi: 10.7868/S2658670326030066 (in Russ.).

Received: 06.06.2026
Accepted: 03.09.2026

© Никулина И.В. и др., 2026

Введение

Залив Анива расположен в южной части о. Сахалин, здесь находятся прибрежные и морские акватории карбонового полигона «Сахалин», функционирующего в рамках масштабного проекта Карбоновые полигоны России [1], где проводятся исследования гидрологической и гидрохимической структуры вод [2, 3], а также баланса парниковых газов, в том числе оценка вклада штормовых выбросов макрофитов в эмиссию CO_2 [4, 5]. В прибрежной зоне зал. Анива штормовые выбросы макрофитов представляют собой вынос на берег морских водорослей и цветковых растений, преимущественно оторванных от субстрата под воздействием ветровых волн и течений [6]. Они играют важную роль в функционировании литорали: обеспечивают поступление органического вещества из сублиторали на сушу, формируют субстрат для литоральной фауны, вовлекаются в детритные пищевые цепи, и подвергаются микробной трансформации и минерализации органического вещества. Важным элементом является их участие в биогеохимических циклах, особенно углеродном: макрофитный детрит, выброшенный на побережье, частично разлагается с выделением CO_2 и других газов, а часть органического вещества может сохраняться в составе трудноразлагаемых соединений либо повторно вовлекаться в перенос и последующее захоронение в прибрежных отложениях [5, 7, 8].

Для выбросов макрофитов характерна сезонная динамика накопления на побережье зал. Анива, обусловленная двумя основными группами факторов: биологическими (жизненные циклы доминантов) и гидрометеорологическими (ветровое волнение, направление и скорость ветра, наличие ледяного покрова). По видовому составу в выбросах доминирует бурая водоросль *Saccharina japonica*, а также морские травы *Zostera marina и Z. asiatica* [6, 9]. Жизненный цикл сахарины японской включает период активного роста зимой и весной, когда растения накапливают максимальную биомассу, и период отмирания в конце лета – начале осени. Массовое отмирание представителей морских трав рода зостера *Zostera* происходит в осенний период, что приводит к её выбросу на литораль.

Целью настоящего исследования является анализ сезонной изменчивости накопления макрофитов в прибрежной зоне зал. Анива на основе данных непрерывного инструментального мониторинга и полевых обследований.

1. Материалы и методы исследования

Мониторинг и регистрацию событий штормовых выбросов макрофитов проводили в прибрежной зоне северной части зал. Анива. Для исследования были выбраны три участка с характерными их скоплениями – район с. Третья Падь (далее Третья Падь), с. Нечаевка (далее Нечаевка) и с. Пригородное (далее Пригородное) (рис. 1). Согласно данным Амининой и соавторов [9],

© Nikulina I.V. et. al., 2026

максимальная плотность зарослей сахарины (*Saccharina japonica)* наблюдается именно в кутовой части залива (с. Третья Падь – пос. Озерский), что подтверждает выбор данных локаций как ключевых зон аккумуляции.

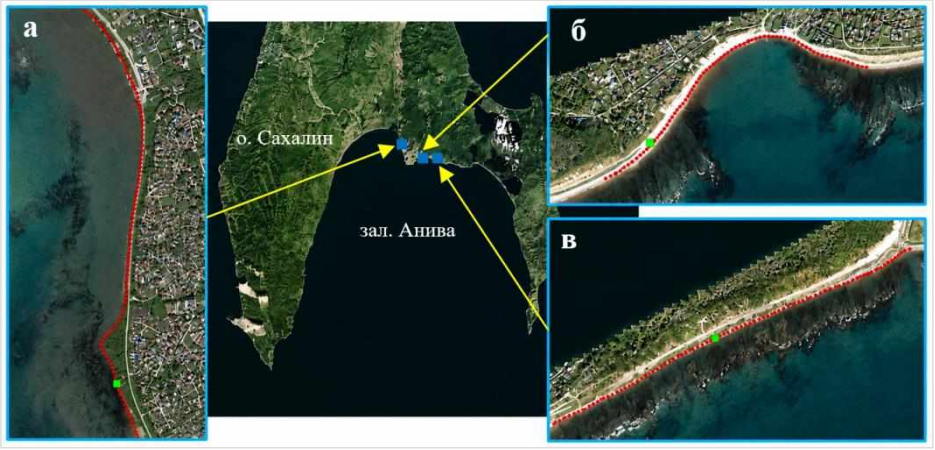


Рис. 1. *Районы исследования: а) с. Третья Падь; б) с. Нечаевка; в) с. Пригородное. Зеленые квадраты – места установки фотоловушек; красные точки – участки фотофиксаций (рисунок подготовлен Никулиной И.В.)*

Для непрерывного мониторинга выбросов макрофитов в каждом районе были установлены автономные фотоловушки (ФЛ) SEELOCK S358, оснащённые GSM-модулем, для передачи данных с часовой дискретностью [10]. Поступающие снимки в оперативном режиме анализировались оператором и при регистрации свежих выбросов, осуществлялись полевые пешие обследования, включающие: определение видового состава, измерение толщины слоя, размера скоплений, проективное покрытие (ПП) и отбор проб. Пробы отбирали на участке площадью 0,25 м^2 в зоне видимости ФЛ, изымая весь объем макрофитов до грунта.

Для количественной оценки площади валов выбросов проводили съемку береговой зоны с использованием смартфона со стандартизированной высоты с применением телескопической монополы, что обеспечивало единообразие угла и масштаба съёмки для каждого кадра. Выделение площадей выполняли методом семантической сегментации изображений. Для подготовки обучающей выборки на части исходных снимков вручную были сформированы эталонные бинарные маски, обозначающие области скоплений макрофитов. В качестве сегментационной модели применяли свёрточную нейронную сеть архитектуры U-Net [11] с энкодером ResNet18 [12], предварительно обученным на наборе

© Никулина И.В. и др., 2026

изображений Image Net [13]. Данная архитектура представляет собой тип «энкодер–декодер», который позволяет извлекать признаки изображения и восстанавливать его пространственную структуру для формирования точной сегментационной маски. Применение U-Net является современным и апробированным подходом. В ряде исследований, в том числе для картирования «пляжного вала» (beach wrack) и макроводорослей, точность такой классификации достигала 90% и выше, что подтверждает высокую эффективность метода для задач мониторинга прибрежных экосистем [14]. В процессе обучения применяли процедуры аугментации данных, включавшие повороты и отражения изображений, что позволило повысить обобщающую способность модели при ограниченном объёме обучающей выборки. В результате обработки каждого снимка модель формировала вероятностную карту принадлежности пикселей к классу макрофитов. После применения установленного порогового значения карта преобразовывалась в бинарную маску, содержащую пиксели, классифицированные как участки скопления макрофитов.

Для перевода результатов сегментации в физические единицы использовался калибровочный снимок с объектом известной длины (масштабная линейка). На основании установленного пространственного масштаба определялась площадь, соответствующая одному пикселю исходного изображения. Площадь макрофитов на отдельном снимке (S_i) рассчитывалась по формуле:

$$S_i = N_i s_p$$

N_i – количество пикселей, классифицированных как макрофиты; s_p – площадь одного пикселя, м^2.

На основе полученных значений были подготовлены временные ряды для отдельных участков побережья в разные месяцы за период наблюдений. Сформированные бинарные маски и полученные значения проходили экспертный визуальный контроль путём их сопоставления с исходными снимками. Средняя относительная ошибка составила 8%. С учётом ограниченного объёма обучающей выборки, использования единой калибровочной оценки пространственного масштаба и приближённого учёта перекрытия кадров полученные значения рассматриваются прежде всего, как сопоставимые оценки пространственно-временной изменчивости площади скоплений макрофитов, а не как результаты высокоточного фотограмметрического картографирования.

Таким образом, методом фотофиксации были обследованы выбросы макрофитов четырёх штормовых событий 2025 г. (в июне, августе, октябре и

© Nikulina I.V. et. al., 2026

ноябре) на участках протяжённостью: Нечаевка – 1060 м, Пригородное – 1280 м, Третья Падь – 1510 м (рис. 1). Протяжённость определялась суммированием геодезических расстояний между последовательными точками фотофиксации. Для нормирования площадей использовались базовые длины участков. Значения площадей макрофитов приведены на 30 м длины береговой линии (в том числе и пиковые значения).

Для оценки эмиссионного потенциала и скорости деструкции штормовых выбросов проводился лабораторный анализ проб. Определяли влажность (методом высушивания при 105°C до постоянной массы), содержание общего углерода (C) и общего азота (N) с использованием элементного анализатора VELP 802, после чего рассчитывалось соотношение C/N.

2. Результаты исследований

На основе ранее выполненных работ в северной части зал. Анива были выделены три устойчивые зоны аккумуляции макрофитов, приуроченные к районам с. Третья Падь, с. Нечаевка и с. Пригородное [6, 15]. Мощность слоя выбросов в этих зонах изменялась от 15 до 140 см, а протяжённость скоплений в летне-осенний период варьировала от 100 м (Пригородное) до 260 м (Третья Падь). Такая пространственная неоднородность обусловлена как близостью донорских сообществ макрофитов в сублиторали, так и морфологическими особенностями береговой линии, определяющими её аккумуляционный потенциал.

В районе с. Третья Падь зона бенча сложена илистыми и песчаными отложениями, с. Нечаевка и с. Пригородное – каменистыми [16], на границе абразионной платформы произрастает плантация сахарины японской (*Saccharina japonica)*. Морфология побережья представляет собой как открытые, прямолинейные участки, так и участки с изогнутой линией берега (бухты, заливы), способствующие аккумуляции макрофитов. На рисунке 2 приведён пример последовательных стадий формирования и деградации скопления макрофитов на открытом участке побережья в районе с. Нечаевка: а) 14 сентября – фиксация начального штормового выброса (с доминированием *Saccharina japonica*); б) 15 сентября – перемещение биомассы в зону бенча; в) 17 сентября – повторный выброс; г) 19 сентября – высыхание и завершение активной фазы деструкции. В весенне-летний период (в зависимости от толщины слоя) усыхание макрофитов происходит достаточно быстро и составляет от 2 до 5 суток. В прибойной полосе, подверженной воздействию отливов и приливов, а также ветрового волнения, скопления макрофитов, как правило, кратковременны и непостоянны, устойчивые валы формируются на 2-й – 3-й гряде выбросов [6, 15].

© Никулина И.В. и др., 2026

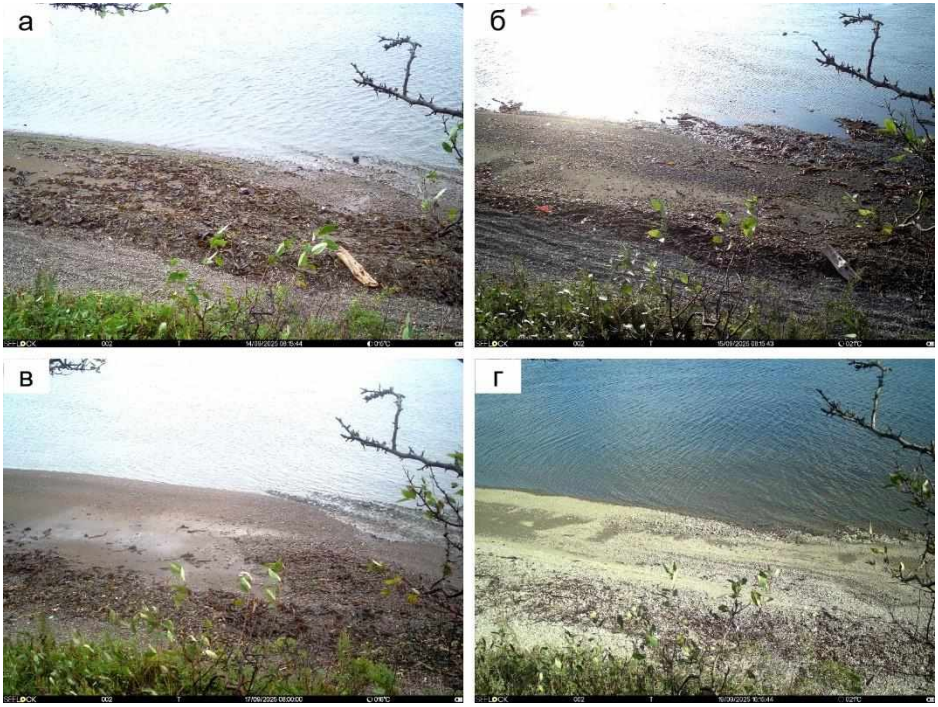


Рис. 2. *Стадии формирования и деградации скопления макрофитов на открытом участке побережья в районе с. Нечаевка (фото Никулиной И.В. с ФЛ): а) штормовой выброс 14 сентября; б) 15 сентября –перемещение биомассы в зону бенча; в) 17 сентября – повторный выброс; г) 19 сентября–высыхание и завершение активной фазы деструкции*

Для количественной оценки выявленных пространственно-временных различий выполнено нормирование площадей скоплений макрофитов на единицу длины береговой линии по данным фотофиксации (табл. 1).

Таблица 1*. Удельная площадь скоплений макрофитов, м² (на 1 м береговой линии)*

Месяц/ локация	**Нечаевка**	**Пригородное**	**Третья Падь**	**Средневзвешенная по протяженности береговой линии**
Июнь	1,75	2,75	0,67	1,66
Август	4,77	3,77	2,73	3,64
Октябрь	9,16	5,86	4,49	6,23
Ноябрь	2,07	1,30	3,11	2,22

© Nikulina I.V. et. al., 2026

В локации Нечаевка пространственная неоднородность скоплений макрофитов нарастает от июня к октябрю (рис. 3). В июне отмечаются локальные пятна, в августе – умеренные скопления, появляются зоны концентрации. В октябре формируются выраженные участки аккумуляции макрофитов площадью до 351 м², что в 1,5 раза превышает максимальные значения августа. Максимальные площади в октябре приурочены к определённым участкам побережья, что указывает на наличие локальных зон аккумуляции. От июня к октябрю пиковое значение площади скоплений увеличивается в 2,3 раза (с 151 до 351 м²). В ноябре происходит резкий спад — пиковое значение площади снижается до 54 м², что в 6,5 раз ниже максимума в октябре. Наблюдаемое изменение связано с прекращением поступления новой биомассы вследствие истощения донорских сообществ, а также с выносом, деструкцией и захоронением ранее выброшенного материала.



Рис. 3. *Пространственное распределение площади скоплений макрофитов (м² на 30 м длины береговой линии) в районе с. Нечаевка по данным фотофиксации в 2025 г. (рисунок подготовлен Никулиной И.В., Шумиловым И.В.)*

В локации Пригородное в июне отмечаются умеренные скопления макрофитов. В отличие от других локаций, здесь наблюдается снижение пиковых значений площади в августе относительно показателей июня (со 166 до 121 м²), что может быть связано с выносом биомассы обратно в залив или её перераспределением. В октябре максимальное значение площади достигает 331 м² — это второй по величине показатель после Нечаевки (351 м²). Скопления приурочены к определённым участкам побережья, что указывает на наличие локальных «ловушек» для выбросов. В ноябре наблюдаются остаточные

© Никулина И.В. и др., 2026

скопления макрофитов. Пиковое значение площади снижается до 41 м² – примерно в 8 раз относительно октября и в 2,9 раза относительно августа (рис. 4).



Рис. 4. *Пространственное распределение площади скоплений макрофитов (м^2 на 30 м длины береговой линии) в районе с. Пригородное по данным фотофиксации в 2025 г. (рисунок подготовлен Никулиной И.В., Шумиловым И.В.)*

В локации Третья Падь снижение площади скоплений от октября к ноябрю выражено слабее, чем в Нечаевке и Пригородном (рис. 5). В июне здесь отмечаются минимальные единичные пятна; в августе наблюдается активный рост площадей и формирование зон концентрации; в октябре образуются мощные скопления. В ноябре, когда в других локациях происходит резкий спад, в Третьей Пади сохраняются значительные скопления макрофитов (пиковое значение площади — 70 м²). Это согласуется с менее выраженным снижением суммарной площади скоплений к ноябрю. Одним из возможных факторов является близость донорских сообществ макрофитов. В осенний период происходит массовое отмирание зостеры, произрастающей на литорали; отмершая биомасса выносится и накапливается на побережье в кутовой части залива.

В результате проведенного анализа можно выделить 4 периода, отражающих закономерности сезонной динамики накопления макрофитов на побережье зал. Анива. Весенне-летний период (март–август) характеризуется относительно невысокой частотой выбросов – порядка 2–3 случаев в месяц. Проективное покрытие при этом варьировало от 10 до 80%. Случаи выбросов с высоким ПП (около 80%) наблюдались синхронно на всех трёх фотоловушках,

© Nikulina I.V. et. al., 2026

что указывает на действие крупномасштабных волновых событий. Выбросы с малым значением ПП фиксировались лишь на одной или двух фотоловушках, что свидетельствует о локальном характере этих событий. По данным наземной фотофиксации, площадь скоплений в этот период возрастает от июня к августу в 2,2 раза (с 6,4 тыс. до 14,0 тыс. м²), что подтверждает постепенное накопление биомассы.



Рис. 5. *Пространственное распределение площади скоплений макрофитов ($м^2$ на 30 м длины береговой линии) в районе с. Третья Падь по данным фотофиксации 2025 г. (рисунок подготовлен Никулиной И.В., Шумиловым И.В.)*

В осенний период (сентябрь–октябрь) отмечается значительная интенсификация выбросов – до 7 случаев в месяц, что связано с усилением ветрового волнения в этот сезон [17]. Согласно данным [18] летне-осенняя интенсификация водообмена залива с морем в 3–5 раз превосходит весенний уровень. Именно в этот период происходит массовое отмирание зостеры и её вынос на литораль, что увеличивает долю морских трав в составе выбросов [6] (в отдельных случаях мощность слоя достигала 140 см.). Площадь скоплений достигает максимума в октябре – 24,0 тыс. м² (удельная площадь 6,2 тыс. м²/км), что сопоставимо с оценкой Завьялова и соавторов [4] (6,6 тыс. м²/км). При прямом сопоставлении следует учитывать различия в пространственном охвате и методике обследований.

Осенне-зимний переходный период (ноябрь–середина декабря) характеризуется резкой пространственной дифференциацией. В Нечаевке и Пригородном происходит резкий спад площади скоплений (в 4,4–4,5 раза), тогда как в Третьей Пади спад минимален (всего в 1,4 раза), площадь скоплений

© Никулина И.В. и др., 2026

остаётся значительной и составляет около 4,7 тыс. м². Это расхождение связано с прекращением активного поступления новой биомассы и выносом остатков выбросов обратно в море при сохранении ветрового волнения [6]. Относительно слабый спад площади скоплений в Третьей Пади от октября к ноябрю может быть связан с близостью плотных зарослей зостеры в кутовой части залива.

В зимний период (середина декабря–февраль) происходит резкая смена условий (рис. 6). Побережье покрывается снегом, под которым в отдельных зонах сохраняются остатки осенних выбросов макрофитов. В декабре начинается активная генерация ледяного покрова в морской акватории [19]. *В ледовом сезоне 2025/2026 гг. устойчивый ледяной покров в районе Третьей Пади сохранялся лишь 6 суток, после чего был разрушен волнением.* В районе Нечаевки и Пригородного формируются только начальные виды льда, которые ежедневно разрушаются. Генерация льда в прибрежной части залива прекращается в марте. Однако наличие ледяного покрова в Охотском море и в южной части залива существенно ограничивает формирование ветровых волн и зыби, что вероятно приводит к уменьшению количества выбросов. *Также необходимо учитывать истощение донорских сообществ.*



Рис. 6. *Генерация ледяного покрова в зимний период в зал. Анива (фото Никулиной И.В. с ФЛ): а) 15.01.2026 г. нарастание ледяного покрова в районе Третьей Пади; б) 18.01.2026 г. разрушение ледяного покрова; в) 18.01.2026 г. блинчатый лед в районе Пригородного*

Выявленная сезонная динамика площадей скоплений дополнена анализом физико-химических свойств самой биомассы. Поскольку интенсивность разложения органического вещества зависит в том числе от влажности, состава биомассы и её элементного соотношения C/N, был проведён лабораторный анализ проб, отобранных в августе, октябре и ноябре 2025 г. в трёх исследованных локациях (табл. 2).

Влажность проб варьировала от 50,0 до 85,8% в зависимости от типа скопления и сезона. Максимальная влажность (85,8%) зафиксирована в августе в Нечаевке (сплошной вал в зоне приливного увлажнения), минимальная (50,0%) – в октябре в Пригородном (сухие разрозненные выбросы). Пробы из сплошных валов в зоне активного увлажнения характеризовались влажностью 73,1–85,8%,

© Nikulina I.V. et. al., 2026

тогда как разрозненные сухие скопления – 50,0–79,4%. Высокая влажность (>80%) в сплошных валах создаёт благоприятные условия для анаэробных процессов, что может приводить к образованию метана в толще скоплений [4, 7].

***Таблица 2**. Результаты лабораторного анализа проб штормовых выбросов макрофитов (средние значения по локациям и сезонам)*

Параметр	Август	Октябрь	Ноябрь	Все пробы
Влажность,%	81,3 ± 7,3	68,2 ± 14,6	72,9 ± 13,3	72,8 ± 13,6
C, %	24,2 ± 1,7	31,5 ± 6,4	32,2 ± 4,8	29,9 ± 6,3
N, %	2,30 ± 0,30	2,07 ± 0,52	1,86 ± 0,17	2,06 ± 0,40
C/N	10,6 ± 1,1	15,3 ± 3,4	16,7 ± 2,4	15,0 ± 3,6

Содержание азота (N) в пробах изменялось от 1,61 до 2,92%, составляя в среднем 2,06%. Значительное содержание азота связано с наличием белковых соединений в биомассе макрофитов [20]. Содержание углерода (C) было значительно выше – от 22,23 до 40,70%, в среднем 29,9%. Снижение среднего содержания азота от августа к ноябрю (с 2,30 до 1,86%) (табл. 2) может быть связано как с изменением видового состава выбросов (среднее содержание азота в сахарине выше, чем в зостере [21, 22]), физиологическим состоянием растений (к осени при разрушении таллома азот вымывается) [23], изменчивостью содержания азота в воде [24], так и с потреблением азотистых соединений микроорганизмами при разложении биомассы (в том числе денитрификацией). Рост содержания углерода объясняется физиологическими процессами в водорослях (углерод накапливается в ламинарии летом для роста осенью [24], накоплением микробной биомассы и трудноминерализуемыми продуктами разложения биомассы на литорали.

Соотношение C/N – ключевой показатель, определяющий скорость разложения, поглощения и накопления органического вещества. В исследованных пробах C/N варьировало от 9,6 до 20,0, составляя в среднем 15,0. Минимальное C/N (9,6) зафиксировано в августе в Нечаевке, максимальное (20,0) – в ноябре в Третьей Пади (сухие разрозненные выбросы). Такая динамика отражает как физиологические процессы в растениях (происходит накопление углерода от весны к зиме в процессе выедания азота и уменьшения его концентраций в воде [25], так и состояние пляжевых выбросов в процессе микробной деструкции, когда накапливаются трудноразлагаемые органические вещества [26]. Среднее отношение C/N возрастало от 10,6 ± 1,1 в августе до 15,3 ± 3,4 в октябре и 16,7 ± 2,4 в ноябре. Низкое C/N проб в августе соответствует более высокой относительной обеспеченности органического вещества азотом, тогда как его увеличение к поздней осени может указывать на снижение потенциальной разлагаемости субстрата. Прямые измерения скорости деструкции и потоков CO_2 в настоящем исследовании не проводились.

© Никулина И.В. и др., 2026

Выявленная динамика C/N (увеличение от августа к ноябрю) согласуется с данными исследований, показывающих, что для ламинариевых водорослей и морских трав характерно высокое C/N соотношение к концу сезона вегетации, а также быстрой утилизации азотистых соединений, накоплению трудноразгалаемых органических веществ в процессе микробной деструкции выбросов на литорали, и в целом снижению активности микробного сообщества к поздней осени, выражающего в замедлении минерализации мортмассы в условиях лимита азота и снижения температуры.

Заключение

На основе полевых, инструментальных наблюдений с использованием фотоловушек и наземной фотофиксации рассчитаны площади штормовых выбросов макрофитов и проведен анализ сезонной изменчивости их накопления на побережье зал. Анива. Установлено, что в период осеннего максимума (октябрь) площадь скоплений макрофитов в трёх обследованных локациях составила 24,0 тыс. м², что соответствует удельной площади 6,2 тыс. м²/км. Эта величина сопоставима с оценкой Завьялова и соавторов [4] – 6,6 тыс. м²/км для всего побережья залива. Близость величин показывает согласованность оценок по порядку значений, однако при их сравнении следует учитывать различия пространственного охвата и методики наблюдений. Таким образом, данные настоящего исследования подтверждают и детализируют полученные ранее оценки на локальном уровне.

По данным наблюдений 2025–2026 гг. выявлены выраженные внутригодовые изменения частоты штормовых выбросов и площади береговых скоплений макрофитов: весенне-летний период (март–август) – 2–3 выброса в месяц с площадью скоплений от 6,4 тыс. до 14,0 тыс. м²; осенний период (сентябрь–октябрь) – до 7 выбросов в месяц с максимальной площадью 24,0 тыс. м² (октябрь); осенне-зимний переход (ноябрь–середина декабря) – резкий спад до 8,6 тыс. м²; зимний период (вторая половина декабря–февраль) – сокращение выбросов из-за ледообразования*, снижения штормовой активности, истощения донорских сообществ*. Во всех трёх локациях максимальные площади обследованных скоплений были отмечены в октябре. В Третьей Пади площадь скоплений от октября к ноябрю уменьшилась в 1,4 раза, тогда как в Нечаевке и Пригородном – соответственно в 4,4 и 4,5 раза. В ноябре удельная площадь скоплений в Третьей Пади (3,11 м²/м) превышала показатели Нечаевки (2,07 м²/м) и Пригородного (1,30 м²/м). Это свидетельствует о меньшем осеннем спаде на данном участке; возможным фактором является близость зарослей зостеры в зоне литорали.

Лабораторный анализ выявил сезонные различия физико-химических характеристик выбросов. Влажность проб варьировала от 50,0 до 85,8%, достигая максимума в сплошных валах в зоне приливного увлажнения.

© Nikulina I.V. et. al., 2026

Содержание C и N составляет в среднем 29,9% и 2,06% соответственно. C/N соотношение варьировало от 9,6 до 20,0, увеличиваясь от августа к ноябрю, что может свидетельствовать об изменении условий и состава субстрата, влияющих на скорость микробной деструкции к концу осени. В весенне-летний период (август) высокая влажность (81,3%) и минимальное соотношение C/N (10,6) создают наиболее благоприятные условия для аэробной микробной деструкции, и соответственно высокого эмиссионного потенциала CO_2 [6, 8]. В осенний период (октябрь) формируются мощные сплошные валы мощностью до 140 см, внутри которых вследствие ограниченной аэрации и высокой влажности развиваются анаэробные условия, способствующие образованию метана [4, 7]. В ноябре разложение замедляется (C/N возрастает до 16,7), а с наступлением зимы процессы деструкции практически останавливаются, и органика консервируется под снежно-ледяным покровом до весны. Таким образом, полученные характеристики указывают на выраженную сезонную изменчивость условий разложения береговых выбросов; количественная оценка потоков CO_2 и CH_4 требует прямых газовых измерений.

Скопления макрофитов на литорали являются эффективными индикаторами биологических запасов прибрежных сообществ и их устойчивости к штормовому воздействию, что обосновывает целесообразность использования фотоловушек и наземной фотофиксации для регулярного мониторинга состояния макрофитобентоса в условиях климатических изменений. Кроме того, береговые скопления представляют собой потенциально значимый временный резервуар органического углерода, деструкция которого должна учитываться при построении биогеохимических моделей и оценке углеродного баланса прибрежной зоны зал. Анива.

Литература

1. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Под редакцией С.К. Гулева и А.В. Ольчева – Москва: Научный мир, 2025. 420 с.
2. Myslenkov S., Pishchalnik V., Arkhipkin V., Romanyuk V., Chastikov V., Latkovskaya E. Physical oceanography of Aniva Bay (Sea of Okhotsk). Pure and Applied Geophysics. 2026. Vol.183, P.3821–3848. DOI:10.1007/s00024-026-04028-6.
3. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site ‘Carbon-Sakhalin’ (Aniva Bay, Sea of Okhotsk). Sustainability. 2024. Vol. 16, No.7. P.3031.DOI: 10.3390/su16073031.
4. Завьялов Р.В., Латковская Е.М., Карамышев В.В., Репина М.А. Оценка возможных объемов штормовых выбросов макрофитов на побережье зал. Анива (Охотское море) // Уральский научный вестник. 2023. Т. 6. № 7. С. 16–23.
5. Леонов А.В., Архипкин В.С., Пищальник В.М., Латковская Е.М. Моделирование динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива (Охотское

© Никулина И.В. и др., 2026

море) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. № 6. С. 77–85.
6. Никулина И.В., Мысленков С.А., Латковская Е.М., Пищальник В.М. Штормовые выбросы макрофитов в прибрежной зоне залива Анива: пространственная структура, состав и эмиссионный потенциал // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2026. № 4.С. 107–120. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.81.4.9.
7. Lanari M., Busk T., Holmer M., Moller-Raid T., Torn K., Schubert H., Quintana C.O. From sink to source: Dynamic of greenhouse gases emissions from beach wrack accumulations in a temperate coastal bay // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 925. P. 171783. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171783.
8. Liu S., Trevathan-Tackett S.M., Lewis C.J.E., Ollivier Q.R., Jiang Z., Huang X., Macreadie P.I. Beach-cast seagrass wrack contributes substantially to global greenhouse gas emissions // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 231. P. 329–335. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.047.
9. Аминина Н.М., Вишневская Т.И., Галанин Д.А., Репникова А.Р., Гурулёва О.Н. Характеристика промысловых запасов сахарины японской в заливе Анива (Охотское море) // Известия ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 116–123. DOI: 10.26428/1606-9919-2014-178-116-123.
10. Pan Y., Ayoub N., Schneider-Kamp P., Flindt M.R., Holmer M. Beach Wrack Dynamics Using a Camera Trap as the Real-Time Monitoring Tool // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. Article 813516. DOI: 10.3389/fmars.2022.813516.
11. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9351. P. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
12. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770–778.
13. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009. P. 248–255. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206848.
14. Tiškus E., Bučas M., Gintauskas J., Kataržytė M., Vaičiūtė D. U-Net Performance for Beach Wrack Segmentation: Effects of UAV Camera Bands, Height Measurements, and Spectral Indices // Drones. 2023. Vol. 7. No. 11. P. 670. DOI: 10.3390/drones7110670.
15. Никулина И.В., Латковская Е.М., Шумилов И.В., Романюк В.А., Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Губко Е.М. Анализ динамики штормовых выбросов макрофитов на побережье зал. Анива по данным подспутниковых наблюдений // Природные процессы и катастрофы: изучение и адаптация: тезисы докладов VII Молодежной научной конференции-школы, Южно-Сахалинск, 13–16 октября 2025 г. Южно-Сахалинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2025. С. 60–61.
16. Атлас береговой зоны Сахалина / под ред. П.Ф. Бровко. Владивосток: Администрация Сахалинской области, Дальневосточный государственный университет, Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, 2002. 51 с.

© Nikulina I.V. et. al., 2026

17. Мысленков С.А., Пищальник В.М., Архипкин В.С., Латковская Е.М. Анализ ветрового волнения в заливе Анива по данным моделирования // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 3. С. ES3012. DOI: 10.2205/2025ES000957.
18. Кантаков Г.А., Селина М.С., Щукина Г.Ф. и др. Адвекция, вертикальная устойчивость вод и особенности пространственно-временного распределения фитопланктона в заливе Анива Охотского моря 2001–2003 гг. // Труды СахНИРО. 2007. Т. 9. С. 295–324.
19. Романюк В.А., Пищальник В.М., Шумилов И.В. Особенности ледового режима зал. Анива (Охотское море) как фактор риска при планировании марикультурных хозяйств // Процессы в геосредах. 2022. № 4(34). С. 1820–1826.
20. Duarte C.M. Nutrient concentration of aquatic plants: Patterns across species // Limnology and Oceanography. 1992. Vol. 37. No. 4. P. 882–889. DOI: 10.4319/lo.1992.37.4.0882.
21. Gevaert F., Davoult D., Creach A. et al. Carbon and nitrogen content of Laminaria saccharina in the eastern English Channel: biometrics and seasonal variations // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 2001. Vol. 81. No. 5. P. 727–734. DOI: 10.1017/S0025315401004532.
22. McIlvenny H., Clements A., Helyar S. Revised nitrogen benchmarks identify a critical transition zone in seagrass meadow degradation // Marine Pollution Bulletin. 2026. Vol. 228. P. 119622. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2026.119622.
23. Ding X., Brussaard C.P.D., Timmermans K.R. Effects of elevated temperature on erosion of *Saccharina latissima* (Laminariales, sugar kelp) blades // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2025. Vol. 582. P. 152071. DOI: 10.1016/j.jembe.2024.152071.
24. Gagné J.A., Mann K.H., Chapman A.R.O. Seasonal patterns of growth and storage in Laminaria longicruris in relation to differing patterns of availability of nitrogen in the water // Marine Biology. 1982. Vol. 69. P. 91–101. DOI: 10.1007/BF00396965.
25. Sheppard E.J., Hurd C.L., Britton D.D., Reed D.C., Bach L.T. Seaweed biogeochemistry: Global assessment of C:N and C:P ratios and implications for ocean afforestation // Journal of Phycology. 2023. Vol. 59. P. 879–892. DOI: 10.1111/jpy.13381.
26. Pan Y., Holmer M. Seagrass and macroalgae on shores: unraveling the decomposition of beach wrack on Danish coasts // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2025. Vol. 324. P. 109473. DOI: 10.1016/j.ecss.2025.109473.

References

1. *Carbon polygons: monitoring, geoinformation systems, sequestration technologies*. (2025). (S.K. Gulev & A.V. Olchev, Eds.). Moscow: Nauchnyy Mir, 420 p. (in Russ.).
2. Myslenkov, S., Pishchalnik, V., Arkhipkin, V., Romanyuk, V., Chastikov, V., & Latkovskaya, E. (2026). Physical oceanography of Aniva Bay (Sea of Okhotsk). *Pure and Applied Geophysics, 183,* 3821–3848.doi:10.1007/s00024-026-04028-6.
3. Pishchalnik, V., Myslenkov, S., Latkovskaya, E., & Arkhipkin, V. (2024). Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site 'Carbon-Sakhalin' (Aniva Bay, Sea of Okhotsk). *Sustainability*, *16*(7), 3031.doi: 10.3390/su16073031.
4. Zavyalov, R.V., Latkovskaya, E.M., Karamyshev, V.V., & Repina, M.A. (2023). Assessment of possible volumes of storm emissions of macrophytes on the coast of Aniva Bay (Sea of Okhotsk). *Ural Scientific Bulletin, 6*(7), 16–23. (in Russ.).

© Никулина И.В. и др., 2026

5. Leonov, A.V., Arkhipkin, V.S., Pishchalnik, V.M., & Latkovskaya, E.M. (2023). Modeling of dissolved oxygen concentration dynamics in the waters of Aniva Bay (Sea of Okhotsk). *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography, 78*(6), 77–85. (in Russ.).
6. Nikulina, I.V., Myslenkov, S.A., Latkovskaya, E.M., & Pishchalnik, V.M. (2026). Storm emissions of macrophytes in the coastal zone of Aniva Bay: spatial structure, composition and emission potential. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography, 4*, 107–120.doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.81.4.9. (in Russ.).
7. Lanari, M., Busk, T., Holmer, M., Moller-Raid, T., Torn, K., Schubert, H., & Quintana, C.O. (2024). From sink to source: Dynamic of greenhouse gases emissions from beach wrack accumulations in a temperate coastal bay. *Science of the Total Environment, 925*, 171783. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171783.
8. Liu, S., Trevathan-Tackett, S.M., Lewis, C.J.E., Ollivier, Q.R., Jiang, Z., Huang, X., & Macreadie, P.I. (2019). Beach-cast seagrass wrack contributes substantially to global greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management, 231*, 329–335. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.047.
9. Aminina, N.M., Vishnevskaya, T.I., Galanin, D.A., Repnikova, A.R., &Guruleva, O.N. (2014). Description of *Saccharina Japonic*a commercial stock in the Aniva Bay (Okhotsk Sea). *Izvestiya TINRO, 178*, 116–123.doi: 10.26428/1606-9919-2014-178-116-123.(in Russ.).
10. Pan, Y., Ayoub, N., Schneider-Kamp, P., Flindt, M.R., & Holmer, M. (2022). Beach Wrack Dynamics Using a Camera Trap as the Real-Time Monitoring Tool. *Frontiers in Marine Science, 9*, 813516. doi: 10.3389/fmars.2022.813516.
11. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9351*, 234–241. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
12. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778.
13. Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848.
14. Tiškus, E., Bučas, M., Gintauskas, J., Kataržytė, M., & Vaičiūtė, D. (2023). U-Net Performance for Beach Wrack Segmentation: Effects of UAV Camera Bands, Height Measurements, and Spectral Indices. *Drones, 7*(11), 670. doi: 10.3390/drones7110670.
15. Nikulina, I.V., Latkovskaya, E.M., Shumilov, I.V., Romanyuk, V.A., Zarubina, D.V., Pishchalnik, V.M., & Gubko, E.M. (2025). Analysis of the dynamics of storm wrack of macrophytes on the coast of Aniva Bay according to sub-satellite observations. In coll.:*Natural Processes and Disasters: Study and Adaptation: Abstracts of the VII Youth Scientific Conference-School,* Yuzhno-Sakhalinsk, October 13–16, 2025. Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 60–61. (in Russ.).
16. *Atlas of the Sakhalin coastal zone*. (2002). (P.F. Brovko, Ed.). Vladivostok: Administration of Sakhalin Oblast, Far Eastern State University, Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography, 51 p. (in Russ.).

© Nikulina I.V. et. al., 2026

17. Myslenkov, S.A., Pishchalnik, V.M., Arkhipkin, V.S., & Latkovskaya, E.M. (2025). Analysis of wind waves in Aniva Bay based on modeling data. *Russian Journal of Earth Sciences, 25*(3), ES3012. doi: 10.2205/2025ES000957. (in Russ.).
18. Kantakov, G.A., Selina, M.S., Shchukina, G.F. et al. (2007). Advection, vertical stability of waters and features of the spatio-temporal distribution of phytoplankton in Aniva Bay of the Sea of Okhotsk in 2001–2003. *Proceedings of SakhNIRO, 9,* 295–324. (in Russ.).
19. Romanyuk, V.A., Pishchalnik, V.M., & Shumilov, I.V. (2022). Features of the ice regime of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) as a risk factor when planning mariculture farms. *Processes in Geospheres, 4*(34), 1820–1826. (in Russ.).
20. Duarte, C.M. (1992). Nutrient concentration of aquatic plants: Patterns across species. *Limnology and Oceanography, 37*(4), 882–889. doi: 10.4319/lo.1992.37.4.0882.
21. Gevaert, F., Davoult, D., Creach, A. et al. (2001). Carbon and nitrogen content of *Laminaria saccharina* in the eastern English Channel: biometrics and seasonal variations. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 81*(5), 727–734. doi: 10.1017/S0025315401004532.
22. McIlvenny, H., Clements, A., & Helyar, S. (2026). Revised nitrogen benchmarks identify a critical transition zone in seagrass meadow degradation. *Marine Pollution Bulletin, 228,* 119622. doi: 10.1016/j.marpolbul.2026.119622.
23. Ding, X., Brussaard, C.P.D., & Timmermans, K.R. (2025). Effects of elevated temperature on erosion of *Saccharina latissima* (Laminariales, sugar kelp) blades. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 582,* 152071. doi: 10.1016/j.jembe.2024.152071.
24. Gagné, J.A., Mann, K.H., & Chapman, A.R.O. (1982). Seasonal patterns of growth and storage in *Laminaria longicruris* in relation to differing patterns of availability of nitrogen in the water. *Marine Biology, 69,* 91–101. doi: 10.1007/BF00396965.
25. Sheppard, E.J., Hurd, C.L., Britton, D.D., Reed, D.C., & Bach, L.T. (2023). Seaweed biogeochemistry: Global assessment of C:N and C:P ratios and implications for ocean afforestation. *Journal of Phycology, 59,* 879–892. doi: 10.1111/jpy.13381.
26. Pan, Y., & Holmer, M. (2025). Seagrass and macroalgae on shores: unraveling the decomposition of beach wrack on Danish coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 324,* 109473. doi: 10.1016/j.ecss.2025.109473.

© Никулина И.В. и др., 2026

УДК 551.584.4
DOI: 10.7868/S2658670326030078

Сезонная и пространственная изменчивость почвенных потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа

Кочкина Маргарита Вячеславовна
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0009-0000-2763-8344; e-mail: moreinty@gmail.com

Пушкин Владимир Владимирович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0009-0008-5702-1693; e-mail: sunduksh@gmail.com

Полухин Александр Анатольевич
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-1708-1428; e-mail: aleanapol@gmail.com

Ольчев Александр Валентинович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-6144-5826; e-mail: aoltche@yandex.ru

Гулев Сергей Константинович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-4296-5121; e-mail: gul@sail.msk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований временной и пространственной изменчивости потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Черноморское побережье Северного Кавказа). Основное внимание уделено анализу влияния структуры растительного покрова и микроклиматических условий на сезонную динамику, устойчивость и сопряженность потоков парниковых газов в различных типах экосистем. Полевые наблюдения проводились в 2025 году на участках, различавшихся по структуре растительности и особенностями микрорельефа. Исследования охватывали зрелые сосновые насаждения с доминированием *Pinus brutia var. pityusa*, дубовые сообщества с преобладанием *Quercus petraea*, а также открытые ксерофитные травянисто-кустарничковые сообщества с участием *Quercus pubescens* и

© Kochkina M.V. et al., 2026

разнотравной растительности. Почвенный покров был представлен преимущественно дерново-карбонатными почвами и их антропогенно трансформированными разновидностями, сформировавшимися в результате террасирования склонов. Измерения потоков CO_2 и CH_4 выполнялись с использованием автоматической почвенной камеры Smart Chamber и инфракрасного газоанализатора LI-7810 (LI-COR, США). Дополнительно регистрировались температура и влажность верхнего почвенного горизонта. Установлено, что потоки CO_2 и CH_4 характеризуются выраженной сезонной и пространственной изменчивостью, связанной с особенностями микроклиматических условий и структуры растительного покрова. На протяжении всего периода наблюдений почвы исследуемых экосистем функционировали как источник CO_2 и поглотитель атмосферного CH_4. Наибольшие значения эмиссии CO_2 наблюдались в летний период на открытых ксерофитных участках, характеризовавшихся более высокой амплитудой температурных колебаний почвы. Максимальное поглощение CH_4 отмечалось в лесных, преимущественно дубовых, сообществах, отличавшихся более стабильным температурно-влажностным режимом. Анализ коэффициента вариации показал, что лесные экосистемы характеризовались более устойчивым режимом почвенного газообмена по сравнению с открытыми травянисто-кустарничковыми участками. Для лесных сообществ была выявлена устойчивая отрицательная сопряженность потоков CO_2 и CH_4, тогда как на открытых участках в летний период наблюдалось ослабление связи между потоками. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли структуры растительного покрова и микрорельефа в регуляции пространственно-временной организации почвенного углеродного обмена в экосистемах Черноморского побережья Северного Кавказа.

Ключевые слова: потоки CO_2, потоки CH_4, почвенное дыхание, метанотрофия, устойчивость экосистем, коэффициент вариации, сопряженность функционирования, карбоновый полигон, углеродный цикл, Северный Кавказ

Благодарности. Авторы выражают признательность Институту океанологии РАН за помощь в организации полевых работ на карбоновом полигоне в районе Геленджика. Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания (проект № FMWE-2026-0001).

Для цитирования: Кочкина М.В., Пушкин В.В., Полухин А.А., Ольчев А.В., Гулев С.К. Сезонная и пространственная изменчивость почвенных потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 105–127. DOI: 10.7868/S2658670326030078

Дата поступления в редакцию: 20.07.2026.
Дата принятия к публикации: 11.09.2026.

© Кочкина М.В. и др., 2026

UDC 551.584.4
DOI: 10.7868/S2658670326030078

Seasonal and spatial variability of soil CO_2 and CH_4 fluxes in natural ecosystems of the coastal area of the carbon supersite on the Black Sea coast of the North Caucasus

Margarita V. Kochkina
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0000-2763-8344; e-mail: moreinty@gmail.com

Vladimir V. Pushkin
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0008-5702-1693; e-mail: sunduksh@gmail.com

Alexander A. Polukhin
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-1708-1428; e-mail: aleanapol@gmail.com

Alexander V. Olchev
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-6144-5826; e-mail: aoltche@yandex.ru

Sergey K. Gulev
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-4296-5121; e-mail:gul@sail.msk.ru

Abstract. This study presents the results of the temporal and spatial variability of near-surface soil CO_2 and CH_4 fluxes in natural ecosystems of the coastal area of the carbon supersite of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Black Sea coast

© Kochkina M.V. et al., 2026

of the North Caucasus). The study focuses on the influence of vegetation structure and microclimatic conditions on the seasonal dynamics, stability, and coupling of greenhouse gas fluxes in different ecosystem types. Field observations were conducted in 2025 at sites differing in vegetation structure and microtopography conditions. The study covered grown pine stands dominated by *Pinus brutia* var. *pityusa*, oak communities with predominance of *Quercus petraea*, and open xerophytic shrub–grass communities with the participation of *Quercus pubescens* and forb vegetation. The soil cover was represented mainly by Rendzic Leptosols and their anthropogenically transformed counterparts formed as a result of slope terracing. CO_2 and CH_4 fluxes were measured using an automated Smart Chamber soil chamber system coupled with a LI-7810 infrared gas analyzer (LI-COR, USA). Soil temperature and moisture in the upper soil horizon were additionally recorded. The results demonstrated pronounced seasonal and spatial variability of CO_2 and CH_4 fluxes associated with microclimatic conditions and vegetation structure. Throughout the observation period, soils of the studied ecosystems functioned as a source of CO_2 and a sink of atmospheric CH_4. The highest CO_2 emissions were observed during the summer period at open xerophytic sites characterized by a greater amplitude of soil temperature fluctuations. Maximum CH_4 uptake was recorded in forest ecosystems, particularly in oak communities, which were characterized by more stable temperature and moisture conditions. Analysis of the coefficient of variation showed that forest ecosystems exhibited a more stable soil gas exchange regime compared to open shrub–grass communities. Forest ecosystems were characterized by a persistent negative coupling between CO_2 and CH_4 fluxes, whereas open sites showed a weakening of this relationship during the summer period. The obtained results demonstrate the important role of vegetation structure and microtopography in regulating the spatial and temporal organization of soil carbon exchange in ecosystems of the Black Sea coast of the North Caucasus.

Keywords: CO_2 fluxes, CH_4 fluxes, soil respiration, methanotrophy, ecosystem resilience, coefficient of variation, functional coupling, carbon supersite, carbon cycle, North Caucasus.

Acknowledgments. The authors would like to acknowledge the assistance of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in organizing the fieldwork conducted at the carbon supersite near Gelendzhik. This work was carried out with financial support from a state funding program (project No. FMWE-2026-0001).

For citation: Kochkina M.V., Pushkin V.V. Polukhin A.A., Olchev A.V., Gulev S.K. (2026). Seasonal and spatial variability of soil CO_2 and CH_4 fluxes in natural ecosystems of the coastal area of the carbon supersite on the Black Sea coast of the North Caucasus. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 105–127. doi: 10.7868/S2658670326030078 (in Russ.).

Received: 20.07.2026.
Accepted: 11.09.2026.

© Кочкина М.В. и др., 2026

Введение

Современные климатические изменения в значительной степени обусловлены ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4), которые играют ключевую роль в формировании парникового эффекта и радиационного баланса Земли. По данным МГЭИК, начиная с середины XX века глобальная средняя температура приземного воздуха возросла более чем на 1,1 °C, а концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере достигли максимальных за последние 800 тысяч лет значений [1]. Наземные экосистемы выступают важнейшим элементом глобального углеродного цикла, регулируя процессы поглощения, аккумуляции и эмиссии углерода между почвой, растительностью и атмосферой [2, 3].

Почвенный газообмен является одним из наиболее чувствительных компонентов экосистемного углеродного цикла к изменению условий внешней среды, поскольку интенсивность потоков CO_2 и CH_4 определяется как биотическими, так и абиотическими факторами, включая температуру, влажность, структуру растительного покрова и активность микробных сообществ [4, 5]. Глобальный масштаб эмиссии CO_2 из почв оценивается в 98 Пг С год$^{-1}$, что существенно превышает антропогенные выбросы от сжигания ископаемого топлива [3]. Температура почвы рассматривается как один из ключевых факторов регуляции почвенного дыхания, а чувствительность потоков CO_2 к ее изменению традиционно описывается коэффициентом $Q_{10,}$ отражающим степень изменения интенсивности дыхания при повышении температуры на 10 °C [5, 6]. Однако зависимость интенсивности почвенного дыхания от температуры носит нелинейный характер: при превышении температурного оптимума активность микробиоты и корневого дыхания может снижаться вследствие термического стресса и деградации ферментативной активности [4–6].

В последние годы особое внимание уделяется способности аэробных лесных и травянистых почв функционировать в качестве устойчивого стока атмосферного CH_4 благодаря активности метанотрофных микроорганизмов [5, 7]. Показано, что интенсивность поглощения CH_4 определяется содержанием органического углерода, степенью аэрации почвы и температурно-влажностным режимом верхнего почвенного горизонта [8].

Несмотря на значительный объем исследований, в большинстве современных работ потоки CO_2 и CH_4 рассматриваются изолированно, тогда как в природных экосистемах они являются взаимосвязанными компонентами единой системы почвенного углеродного обмена. В последние годы все большее внимание уделяется анализу сопряженности (coupling) потоков CO_2 и CH_4, отражающей степень согласованности между процессами почвенного дыхания и метанотрофии [9, 10]. Нарушение этой сопряженности (decoupling) может свидетельствовать о дестабилизации функционирования почвенных микробных

© Kochkina M.V. et al., 2026

процессов под воздействием климатических стрессов, прежде всего перегрева и иссушения верхнего почвенного горизонта.

Экосистемы Черноморского побережья Северного Кавказа отличаются высокой пространственной неоднородностью почвенно-растительного покрова, обусловленной как природными условиями, так и антропогенной трансформацией склонов. Для региона характерно чередование лесных и открытых ксерофитных сообществ, формирующих контрастные температурно-влажностные условия почвы и различный режим почвенного газообмена.

Несмотря на растущий объем исследований, региональные данные по потокам парниковых газов для экосистем Северного Кавказа остаются ограниченными. Особую значимость приобретают наблюдения, выполняемые в рамках сети российских карбоновых полигонов, предназначенных для мониторинга углеродного баланса природных экосистем [11, 12].

Исследуемая территория расположена в пределах берегового участка карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа. Растительность представлена спелыми дубово-сосновые насаждениями с доминированием *Pinus brutia* var. *Pityusa*, дубовыми сообществами с преобладанием *Quercus petraea*, а также открытыми ксерофитными травянисто-кустарничковыми сообществами с участием *Quercus pubescens* и разнотравной растительности. Такое сочетание различных типов растительного покрова и микрорельефа формирует контрастные температурно-влажностные условия почвы и делает территорию перспективным объектом для изучения пространственно-временной организации потоков CO_2 и CH_4.

В отличие от большинства ранее проведенных исследований, в настоящей работе потоки CO_2 и CH_4 рассматриваются как сопряженные элементы единой системы почвенного углеродного обмена. Особое внимание уделено анализу устойчивости потоков в экосистемах с различной структурой растительного покрова, а также оценке сезонной динамики «сопряженности» и «разобщения» процессов почвенного дыхания и метанотрофии.

В качестве рабочей гипотезы в исследовании было выдвинуто предположение, что экосистемы с древесным пологом будут характеризоваться более устойчивым режимом почвенного газообмена и более выраженной сопряженностью потоков CO_2 и CH_4 по сравнению с открытыми травянисто-кустарничковыми участками благодаря сглаживанию температурных и влажностных колебаний почвы под пологом древесной растительности.

Целью настоящей работы являлась оценка сезонной и пространственной изменчивости потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Черноморского побережья Северного Кавказа, анализ сопряженности потоков парниковых газов и их устойчивости в экосистемах с различной структурой растительного покрова.

© Кочкина М.В. и др., 2026

1. Материалы и методы

Полевые исследования проводились на территории берегового участка карбонового полигона Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, расположенного в районе г. Геленджика (Краснодарский край, Черноморское побережье Северного Кавказа) (рис. 1). Климат района характеризуется переходными чертами от средиземноморского к влажному субтропическому типу с теплым сухим летом и мягкой зимой. Среднегодовое количество осадков составляет около 700–900 мм при выраженном летне-осеннем максимуме.



Рис. 1. *Карта-схема расположения берегового участка карбонового полигона ИО РАН в районе г. Геленджика и экспериментальных площадок наблюдений*

Измерения потоков CO_2 и CH_4 выполнялись на 17 постоянных экспериментальных площадках, распределенных между тремя основными типами экосистем, и охватывали участки, различавшиеся по структуре растительного покрова, микрорельефу и степени антропогенной трансформации склонов:

© Kochkina M.V. et al., 2026

- участке приспевающего соснового насаждения с доминированием *Pinus bruti avar. pityusa*;
- участке широколиственного дубового сообщества с преобладанием *Quercus petraea*;
- открытом травянисто-кустарничковом участке с участием *Quercu spubescens* и ксерофитной разнотравной растительности.

Исследуемые участки располагались в пределах антропогенно трансформированного склонового ландшафта, сформированного в результате террасирования и мероприятий по стабилизации растительности во второй половине XX века. Почвенный покров был представлен преимущественно дерново-карбонатными почвами (Rendzic Leptosols) и их антропогенно преобразованными разновидностями.

Различия в сомкнутости древесного полога, степени открытости поверхности почвы и особенностях микрорельефа сформировали контрастные температурно-влажностные условия верхнего почвенного горизонта, что позволяло оценить влияние структуры растительности на сезонную и пространственную изменчивость потоков парниковых газов. Запасы углерода в надземной фитомассе различались более чем в 6 раз: 458,6 т С/га у сосново-дубового леса и 70,5 т С/га у травянисто-кустарничкового сообщества. Почвенный покров преимущественно сформирован дерново-карбонатными почвами, обладающими высокой аэрацией и значительным содержанием органического вещества в верхних горизонтах от 170 до 287 т С/га. Микробная биомасса в верхнем слое почвы в среднем составляла 411 мкг С/г [12].

Измерения потоков парниковых газов выполнялись с использованием автоматической почвенной камеры Smart Chamber, соединенной с инфракрасным газоанализатором LI-7810 (LI-COR, США), обеспечивающим непрерывную регистрацию концентраций CO_2 и CH_4 в камере в режиме реального времени. Потоки рассчитывались по скорости изменения концентрации газов в измерительной камере во времени. Одновременно на каждой экспериментальной площадке регистрировались температура и влажность верхнего почвенного горизонта.

Полевые измерения проводились с регулярной периодичностью в течение года, что позволило оценить сезонную динамику потоков CO_2 и CH_4 в различных типах экосистем. Данные, полученные на 17 экспериментальных площадках, использовались для анализа пространственной изменчивости потоков и последующей пространственной интерполяции распределения потоков парниковых газов в пределах исследуемой территории.

Для оценки сезонной устойчивости почвенного газообмена рассчитывался коэффициент вариации (CV) для потоков CO_2 и CH_4. Более низкие значения CV интерпретировались как показатель более стабильного функционирования экосистемы и меньшей временной изменчивости потоков парниковых газов.

© Кочкина М.В. и др., 2026

Анализ сопряженности (coupling) потоков CO_2 и CH_4 выполнялся с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена отдельно для различных типов экосистем и сезонов года. В качестве критерия сопряженности рассматривались статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,05$). Отрицательные значения коэффициента корреляции интерпретировались как согласованное функционирование процессов почвенного дыхания и метанотрофии, тогда как отсутствие статистически значимой связи между потоками рассматривалось как признак их разобщения (decoupling). Для оценки силы сопряженности использовалась следующая градация коэффициентов корреляции: $|r| < 30\%$ - слабая связь, $30\% \leq |r| < 50\%$ - умеренная связь, $|r| \geq 50\%$ - сильная связь.

2. Результаты

2.1. Сезонная и пространственная изменчивость потоков CO_2 и CH_4

Потоки CO_2 и CH_4 в исследуемых экосистемах характеризовались хорошо выраженной сезонной и пространственной изменчивостью, связанной с особенностями микроклиматических условий и структуры растительного покрова. На протяжении всего периода наблюдений почвы исследуемых экосистем функционировали как источник CO_2 и поглотитель атмосферного CH_4.

Средние значения потоков CO_2 в пределах исследуемой территории изменялись от 2,0 до 4,8 мкмоль/(м^{2}с). Максимальные значения эмиссии CO_2 были приурочены к северной части полигона, преимущественно в пределах лесных биогеоценозов, тогда как минимальные значения фиксировались вблизи береговой линии на открытых травянисто-кустарничковых участках (рис. 2).

Для потоков CH_4 диапазон пространственной изменчивости составил от −0,27 до −0,86 нмоль/(м^{2}с). Минимальная интенсивность поглощения CH_4 наблюдалась на прибрежных травянисто-кустарничковых площадках, тогда как максимальное поглощение было характерно для почв лесных биогеоценозов, прежде всего дубовых сообществ (рис. 3).

Сезонная динамика температуры почвы существенно различалась между типами экосистем. Наиболее высокие температуры верхнего горизонта почвы отмечались на открытых травянисто-кустарничковых участках, где в дневные часы температура превышала в летние дни 35 °C. В лесных сообществах температурный режим почвы отличался более сглаженным сезонным ходом (рис. 4). Сезонная динамика влажности почвы также зависела от типа экосистемы. Наименьшие значения влажности верхнего горизонта почвы наблюдалась в сосновом насаждении, где в сентябре показатели снижались менее 0,05 м^3/м^3. Наиболее высокая влажность почвы была характерна для дубового сообщества, где в весенний и осенне-зимний периоды значения достигали 0,20–0,25 м^3/м^3 (рис. 5).

© Kochkina M.V. et al., 2026

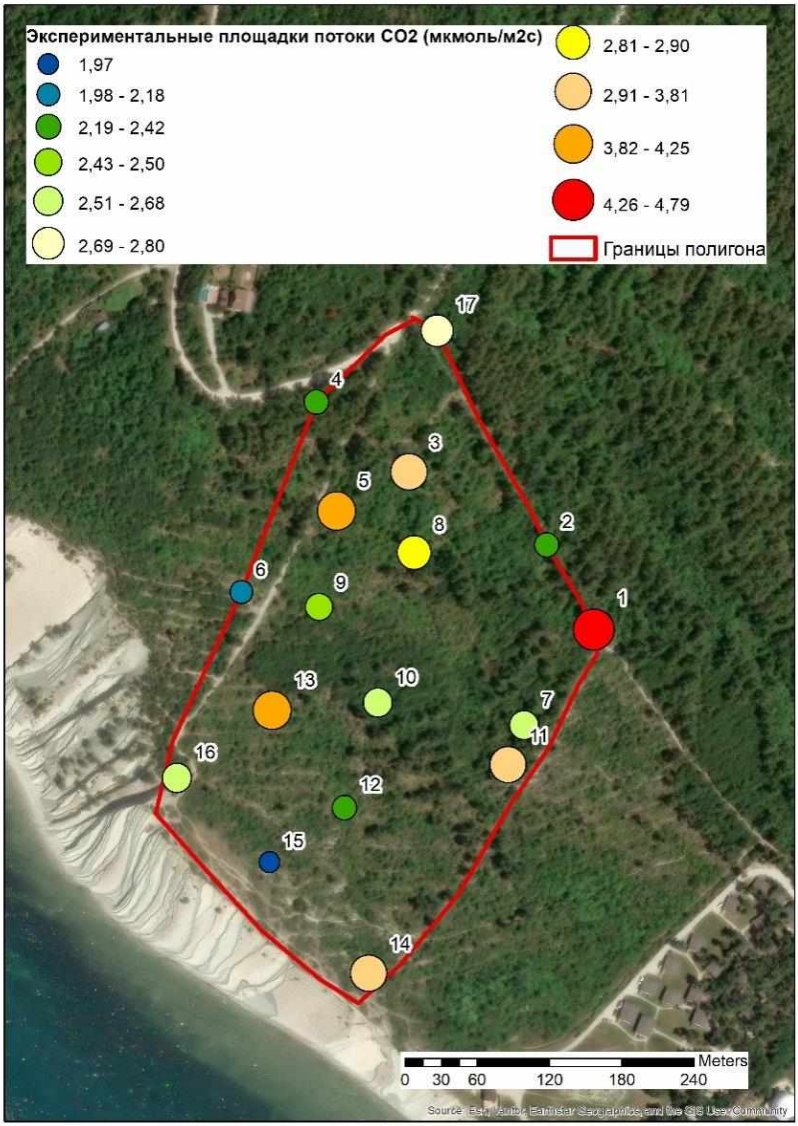


Рис. 2. *Пространственное распределение усредненных значений потоков CO_2 (мкмоль/($м^2$с)) по территории карбонового полигона за летний период 2025 года*

© Кочкина М.В. и др., 2026

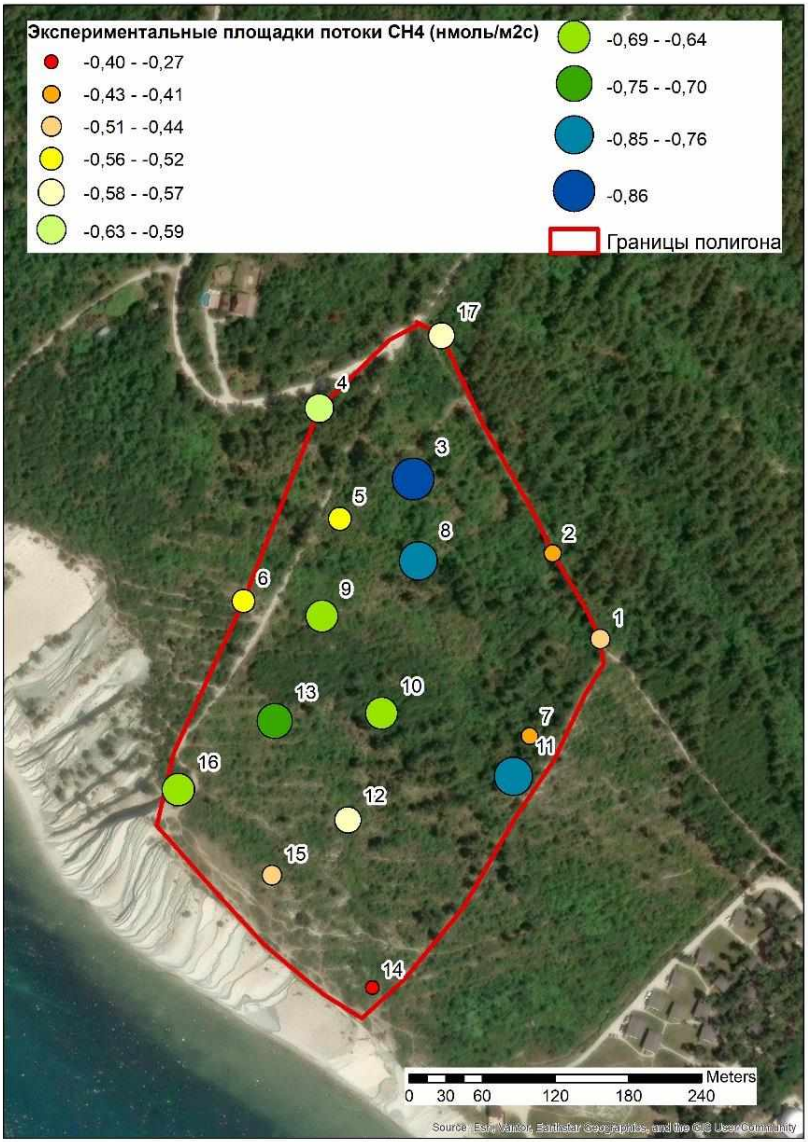


Рис. 3. *Пространственное распределение усредненных значений потоков CH_4 (нмоль/($м^2$с)) по территории карбонового полигона за летний период 2025 года*

© Kochkina M.V. et al., 2026

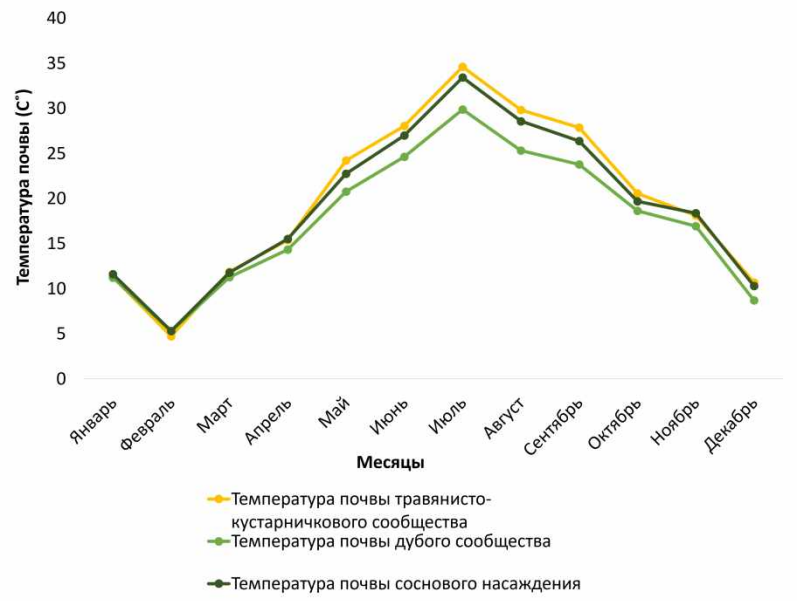


Рис. 4. *Сезонная динамика температуры верхнего почвенного слоя за 2025 год для трех экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество)*

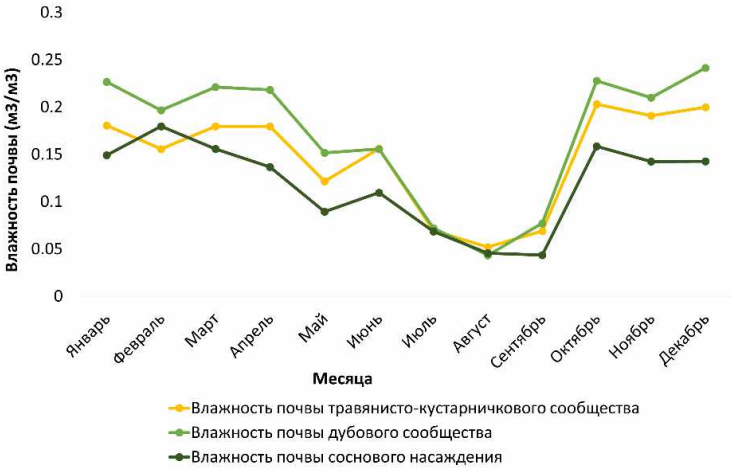


Рис. 5. *Сезонная динамика влажности верхнего почвенного слоя за 2025 год для трех экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество)*

© Кочкина М.В. и др., 2026

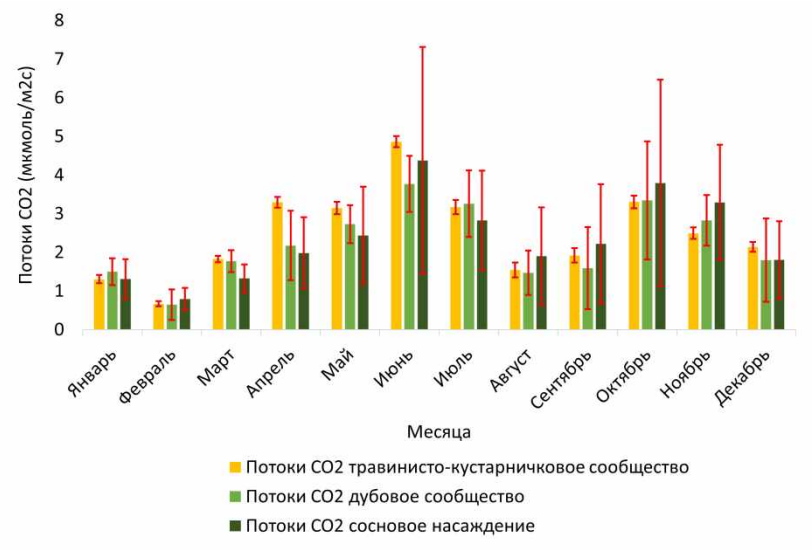


Рис. 6. *Сезонная динамика потоков CO_2 (мкмоль/($м^2$с)) для трех групп экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество) на протяжении 2025 года. Вертикальные линии – стандартное отклонение*

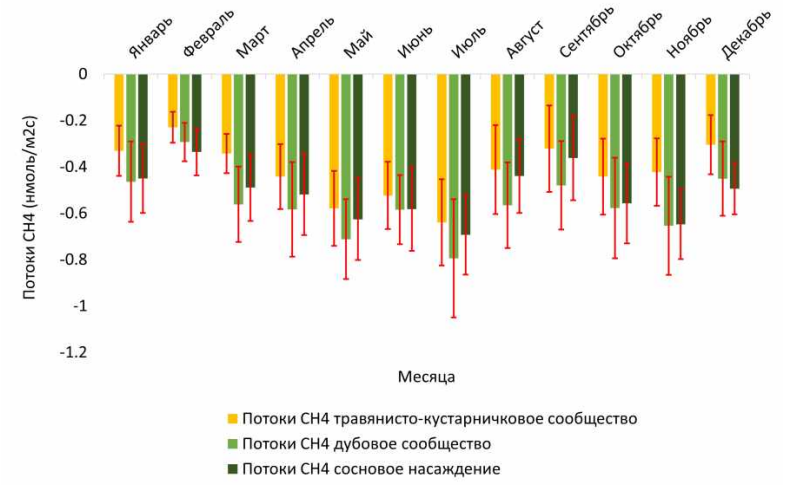


Рис. 7. *Сезонная динамика потоков CH_4 (нмоль/($м^2$с)) для трех групп экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество) на протяжении 2025 года. Вертикальные линии — стандартное отклонение*

© Kochkina M.V. et al., 2026

Минимальные значения потоков CO_2 наблюдались в феврале и составляли около 0,8–0,9 мкмоль/(м^{2}с), при этом различия между лесными и травянисто-кустарничковыми участками были незначительными. Максимальная эмиссия CO_2отмечалась в июне, когда потоки возрастали до 4–5 мкмоль/(м^{2}с) (рис. 6). Наибольшие значения были характерны для открытых травянисто-кустарничковых участков, тогда как минимальные - для дубовых сообществ. Дополнительный локальный максимум потоков CO_2 отмечался в октябре, когда значения эмиссии достигали 4 мкмоль/(м^{2}с) (рис. 6).

Потоки CH_4 на протяжении всего периода наблюдений сохраняли отрицательные значения. Максимальное поглощение атмосферного CH_4 наблюдалось в июле и составляло от −0,65 до −0,80 нмоль/(м^{2}с) (рис. 7). Наиболее интенсивное поглощение фиксировалось в лесных, преимущественно дубовых, сообществах, тогда как минимальные значения были характерны для открытых травянисто-кустарничковых участков. Небольшой дополнительный максимум поглощения CH_4 отмечался в ноябре, когда значения потоков достигали −0,60…−0,65 нмоль /(м^{2}с) (рис. 7).

2.2. Устойчивость и сопряженность потоков CO_2 и CH_4

Анализ CV выявил существенные различия в устойчивости потоков CO_2 и CH_4 между исследуемыми типами экосистем. Наиболее низкие значения CV для потоков CO_2 были характерны для дубовых лесных сообществ и составляли в среднем 15–20%, тогда как на открытых травянисто-кустарничковых участках коэффициент вариации возрастал до 35–45% (рис. 8). Для сосновых насаждений значения CV занимали промежуточное положение и составляли около 20–30% (рис. 8).

Для потоков CH_4 наблюдалась аналогичная закономерность. В лесных экосистемах CV преимущественно находился в пределах 10–20%, тогда как на открытых участках сезонная изменчивость потоков возрастала до 30–50% (рис. 9). Максимальные значения CV отмечались в летний период на травянисто-кустарничковых площадках, характеризовавшихся наиболее высокими температурами поверхности почвы (рис. 9).

Корреляционный анализ выявил различия в характере сопряженности потоков CO_2 и CH_4 между исследуемыми экосистемами. Для дубовых лесных сообществ была характерна наиболее выраженная отрицательная корреляция между потоками, при этом коэффициенты корреляции в течение большей части периода наблюдений изменялись в пределах от −0,6 до −0,8 (рис. 10).

В сосновых насаждениях отрицательная сопряженность потоков также сохранялась, однако она была менее явной и изменялась преимущественно в диапазоне от −0,4 до −0,6 (рис. 10).

© Кочкина М.В. и др., 2026

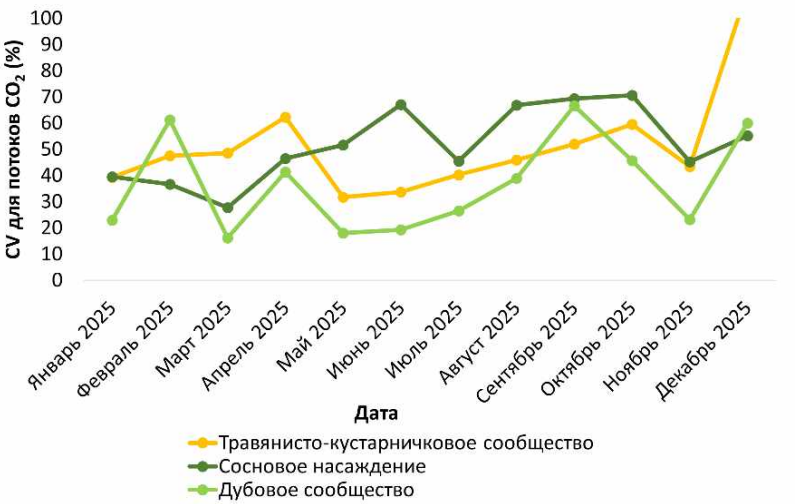


***Рис. 8**. Сезонная динамика коэффициента вариации (CV) потоков CO_2 (%) для трех групп экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество) на протяжении 2025 года*

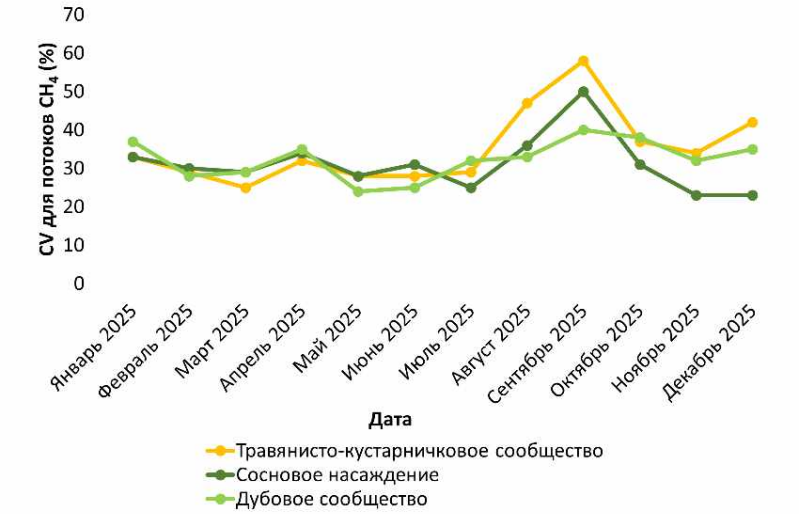


***Рис. 9.** Сезонная динамика коэффициента вариации (CV) потоков CH_4 (%) для трех групп экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество) на протяжении 2025 года*

© Kochkina M.V. et al., 2026

На открытых травянисто-кустарничковых участках в летний период наблюдалось существенное ослабление сопряженности потоков CO_2 и CH_4. Значения коэффициентов корреляции снижались до −0,2…0,0, что свидетельствовало о частичном разобщении процессов эмиссии CO_2 и поглощения CH_4 в условиях максимального прогрева поверхности почвы (рис. 10).

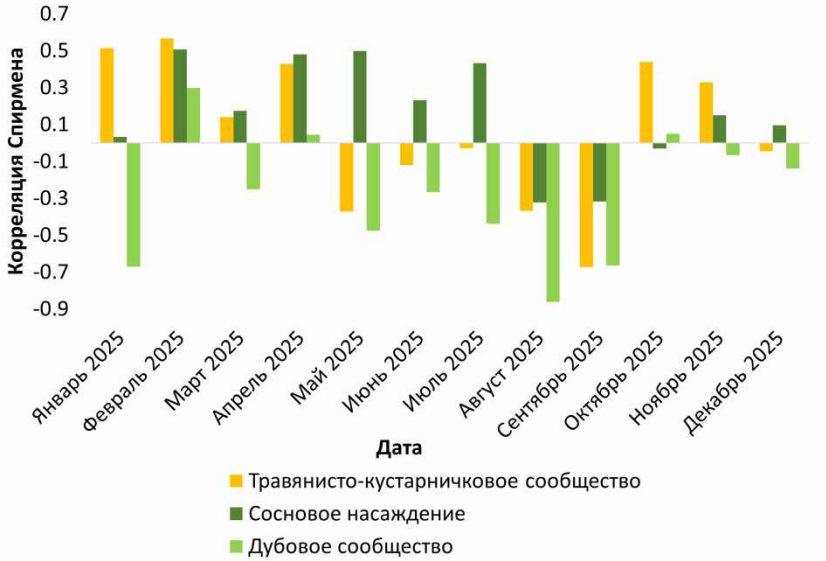


Рис. 10. *Сезонная динамика коэффициента корреляции Спирмена для трех групп экспериментальных участков (дубовое сообщество, сосновое насаждение, травянисто-кустарничковое сообщество) на протяжении 2025 года*

3. Обсуждение результатов

Полученные в настоящем исследовании результаты хорошо согласуются с современными представлениями о механизмах функционирования почвенного углеродного обмена в лесных и травянистых экосистемах умеренного и субтропического поясов [4, 5]. Проведенные наблюдения показали, что структура растительного покрова и особенности микрорельефа в пределах исследуемой территории оказывают существенное влияние как на интенсивность потоков CO_2 и CH_4, так и на устойчивость почвенного газообмена.

Выявленная пространственная неоднородность потоков CO_2 и CH_4 тесно связана с различиями в температурно-влажностном режиме почв между

© Кочкина М.В. и др., 2026

залесенными и открытыми участками. Анализ пространственной изменчивости потоков показал, что потоки CO_2 изменялись в пределах от 2,0 до 4,8 мкмоль/(м^{2}с), тогда как интенсивность поглощения CH_4 варьировала от −0,27 до −0,86 нмоль/(м^{2}с). Максимальные значения эмиссии CO_2 и поглощения CH_4 были характерны преимущественно для лесных биогеоценозов северной части полигона, тогда как минимальные значения наблюдались на открытых прибрежных травянисто-кустарничковых участках.

Подобная пространственная структура потоков, вероятно, связана с буферной ролью древесного полога, формирующего более устойчивый температурно-влажностный режим верхнего почвенного горизонта [13]. В лесных сообществах температура почвы характеризовалась меньшей амплитудой колебаний, тогда как на открытых травянисто-кустарничковых участках в летний период температура поверхности почвы в дневные часы превышала 35 °C.

Выявленная зависимость эмиссии CO_2 от температуры почвы соответствует данным многочисленных исследований, в которых показана максимальная интенсивность почвенного дыхания, наблюдаемая при умеренных температурах [2–4, 14]. Так Liu et al. [15] показали, что стандартная экспоненциальная модель (Q_{10}) систематически завышает дыхание экосистем при превышении температурного оптимума, и данный эффект особенно выражен в теплых и засушливых климатических условиях. Полученные результаты хорошо согласуются с данной концепцией: несмотря на высокий прогрев открытых участков в летний период, максимальные значения эмиссии CO_2 фиксировались не в периоды экстремальных температур, а в июне, когда потоки достигали 4–5 мкмоль/(м^{2}с). В дальнейшем, несмотря на сохранение высоких температур, интенсивность почвенного дыхания снижалась, что может указывать на развитие термического и гидротермического стресса верхнего почвенного горизонта.

Bond-Lamberty и Thomson [2] установили глобальную положительную связь между температурой и суммарным почвенным дыханием, подчеркивая риск усиления почвенной эмиссии CO_2 в условиях глобального потепления. Согласно данным Кургановой и др. [16], ведущим фактором контроля CO_2 в разных биоклиматических зонах страны является температура верхнего горизонта почвы, подтверждаемое результатами настоящего исследования.

Минимальные значения потоков CO_2 в зимний период (0,8–0,9 мкмоль/(м^{2}с)) характеризовались сравнительно небольшими различиями между типами экосистем, тогда как в летний период пространственная неоднородность потоков возрастала. Максимальная эмиссия CO_2 была характерна для открытых травянисто-кустарничковых участков, тогда как в дубовых сообществах значения потоков оставались более низкими и стабильными. Можно ожидать,

© Kochkina M.V. et al., 2026

что это связано с меньшей амплитудой температурных колебаний и более устойчивыми условиями увлажнения в лесных экосистемах.

Устойчивое поглощение CH_4 всеми исследованными типами экосистем на протяжении всего года согласуется с концепцией аэрированных почв под лесной и травянисто-кустарничковой растительностью как основного биологического стока атмосферного CH_4 [5, 6, 17]. Наблюдавшееся усиление поглощения CH_4 в летний период объясняется стимуляцией метанотрофной активности при повышении температуры [18]. Максимальное поглощение CH_4 наблюдалось в июле и достигало −0,65…−0,80 нмоль/(м^{2}с), при этом наиболее интенсивное поглощение фиксировалось в дубовых лесных сообществах. На открытых травянисто-кустарничковых участках интенсивность поглощения CH_4 была существенно ниже. Подобные различия, вероятно, обусловлены сочетанием более стабильного температурно-влажностного режима, повышенного содержания органического вещества и меньшего риска перегрева верхнего почвенного горизонта в лесных экосистемах [7, 19].

Анализ CV выявил существенные различия в устойчивости потоков между исследуемыми типами экосистем. Для дубовых сообществ значения CV потоков CO_2 в среднем составляли 15–20%, тогда как на открытых травянисто-кустарничковых участках CV возрастал до 35–45%. Для потоков CH_4 значения CV в лесных экосистемах преимущественно находились в пределах 10–20%, а на открытых участках достигали 30–50%. Низкие значения CV в лесных экосистемах могут свидетельствовать о более устойчивом режиме почвенного газообмена и высокой буферной способности древесного полога по отношению к сезонным микроклиматическим изменениям [20, 21]. Древесный полог способствует сглаживанию температурных экстремумов, стабилизации влажности почвы и поддержанию более устойчивых условий функционирования почвенной микробиоты [14, 22].

В сосновых насаждениях характер сезонной изменчивости потоков оказался более сложным. Значения CV для потоков CH_4 в отдельные осенние периоды возрастали, что, вероятно, связано с сезонным изменением структуры хвойной подстилки и ее влиянием на тепловой и влажностный режим верхнего почвенного горизонта.

Одним из наиболее значимых результатов исследования стало выявление различий в характере сопряженности потоков CO_2 и CH_4 между типами экосистем. Для дубовых лесных сообществ была характерна наиболее устойчивая отрицательная сопряженность потоков, при которой коэффициенты корреляции в течение большей части года изменялись в пределах от −0,6 до −0,8 ($p < 0,05$). Подобная отрицательная связь может говорить о согласованном функционировании процессов почвенного дыхания и метанотрофии при более стабильных микроклиматических условиях лесных экосистем.

© Кочкина М.В. и др., 2026

В сосновых насаждениях характер сопряженности потоков был менее устойчивым. В весенний период наблюдалась умеренная положительная корреляция между потоками CO_2 и CH_4, тогда как летом она сменялась умеренной отрицательной. Подобная сезонная перестройка сопряженности может отражать изменения в структуре микробных сообществ и особенностях функционирования почвенной подстилки в хвойных экосистемах [9].

На открытых травянисто-кустарничковых участках в летний период значения коэффициентов корреляции снижались до −0,2…0,0, а в отдельные периоды связь между потоками становилась статистически незначимой. Ослабление сопряженности потоков CO_2 и CH_4 в условиях экстремального прогрева поверхности почвы может свидетельствовать о частичном разобщении процессов почвенного дыхания и метанотрофии при развитии термического стресса верхнего почвенного горизонта [9, 10, 23].

Таким образом, результаты исследования показывают, что структура растительного покрова и микрорельеф играют ключевую роль в регулировании устойчивости почвенного углеродного обмена в экосистемах Черноморского побережья Северного Кавказа. Лесные экосистемы характеризуются более стабильным режимом почвенных потоков CO_2 и CH_4 и более выраженной сопряженностью процессов почвенного дыхания и метанотрофии, тогда как открытые ксерофитные сообщества демонстрируют более высокую сезонную изменчивость и ослабление сопряженности потоков в периоды максимального прогрева почвы.

Заключение

В результате проведенных исследований была выполнена оценка сезонной и пространственной изменчивости потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах берегового участка карбонового полигона Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН на Черноморском побережье Северного Кавказа. Исследование охватывало дубовые, сосновые и открытые травянисто-кустарничковые сообщества, различавшиеся по структуре растительного покрова, микрорельефу и температурно-влажностным условиям почвы.

Результаты показали, что почвы карбонового полигона на протяжении всего периода наблюдений функционировали как источник CO_2 и поглотитель атмосферного CH_4. Потоки CO_2 характеризовались четкой сезонной динамикой с минимальными значениями в зимний период (0,8–0,9 мкмоль/(м^{2}с)) и максимальными – в июне, когда интенсивность эмиссии возрастала до 4–5 мкмоль/(м^{2}с). Для потоков CH_4 наиболее интенсивное поглощение наблюдалось в июле и достигало −0,65…−0,80 нмоль/(м^{2}с).

Анализ пространственной изменчивости потоков выявил существенную мозаичность распределения потоков парниковых газов в пределах исследуемой территории. Диапазон пространственной изменчивости потоков CO_2 составлял

© Kochkina M.V. et al., 2026

от 2,0 до 4,8 мкмоль/(м^{2}с), а потоков CH_4 от −0,27 до −0,86 нмоль/(м^{2}с). Максимальные значения эмиссии CO_2 и поглощения CH_4 были характерны преимущественно для лесных биогеоценозов, тогда как минимальные значения фиксировались на открытых прибрежных травянисто-кустарничковых участках.

В ходе исследований было показано, что структура растительного покрова существенно влияет на устойчивость почвенного газообмена. Для дубовых лесных сообществ были характерны наиболее низкие значения CV потоков CO_2 и CH_4 (15–20%), тогда как на открытых травянисто-кустарничковых участках значения CV возрастали до 35–50%.

Одним из ключевых результатов исследования стало выявление различий в характере сопряженности потоков CO_2 и CH_4 между исследуемыми типами экосистем. Для дубовых лесных сообществ была характерна наиболее устойчивая отрицательная сопряженность потоков ($r = −0,6…−0,8$ при $p < 0,05$), отражающая согласованное функционирование процессов почвенного дыхания и метанотрофии. На открытых травянисто-кустарничковых участках в летний период наблюдалось ослабление сопряженности потоков CO_2 и CH_4 вплоть до значений близким к нулю, что может свидетельствовать о частичном разобщении микробных процессов в условиях экстремального прогрева поверхности почвы.

Полученные результаты свидетельствуют о существенной роли структуры растительного покрова и микрорельефа в регулировании пространственно-временной структуры почвенного углеродного обмена в экосистемах Черноморского побережья Северного Кавказа. Лесные сообщества отличаются более устойчивым режимом почвенного газообмена и более высокой сопряженностью потоков CO_2 и CH_4, тогда как открытые ксерофитные экосистемы отличаются высокой сезонной изменчивостью и большей чувствительностью к летним температурным аномалиям.

Полученные данные могут быть использованы для совершенствования региональных оценок углеродного баланса экосистем Черноморского побережья Северного Кавказа, а также при разработке моделей пространственно-временной динамики потоков парниковых газов в антропогенно трансформированных склоновых ландшафтах.

Литература

1. IPCC. Climate Change 2023: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. (доступ: 15.06.2026)
2. Bond-Lamberty, B., Thomson, A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record // Nature. 2010. Vol. 464. P. 579–582.
3. Davidson, E. A., & Janssens, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature. 2006. Vol. 440. P. 165–173.

© Кочкина М.В. и др., 2026

4. Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. Soil respiration and the global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. Vol. 48. P. 7–20.
5. Wigley, K., Armstrong, C., Smaill, S.J., et al. Methane cycling in temperate forests // Carbon Balance and Management. 2024. Vol. 19. Article 37. 20 p.
6. Walkiewicz, A., Bulak, P., Brzezińska, M., & Bieganowski, A. Assessment of soil CO_2, CH_4, and N_2O fluxes and their drivers, and their contribution to the climate change mitigation potential of forest soils in the Lublin region of Poland // European Journal of Forest Research. 2025. Vol. 144. P. 29–52.
7. Lee, J., Oh, Y., Lee, S.T., et al. Soil organic carbon is a key determinant of CH4 sink in global forest soils // Nature Communications. 2023. Vol. 14. Article 3110. 9 p.
8. Rafalska, A., et al. Variation in methane uptake by grassland soils in the context of climate change - A review of effects and mechanisms// Science of the Total Environment. 2023. Vol. 871. 162127 p.
9. Guo, C., Ke, F., Zhang, L., Li, S. Inter-monthly variations in CO_2 and CH4 fluxes in a temperate forest: Coupling dynamics and environmental drivers // Atmosphere. 2025. Vol. 16. 21 p.
10. Yang, M., Yu, G., He, N., et al. Coupling-decoupling of soil CO_2 and CH_4 fluxes and their responses to temperature in arid and semi-arid regions of China // Chinese Journal of Plant Ecology. 2022. Vol. 46. No. 12. P. 1497–1507.
11. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Под редакцией С.К. Гулева и А.В. Ольчева – Москва: Научный мир, 2025. – 420 с.
12. Gorbov, S. N., Salnik, N. V., Tagiverdiev, S. S., et al. Carbon forms and their dynamics in soils of the Carbon Supersite at the Black Sea coast // Soil Systems. 2026. Vol. 10. Article 4. 18 p.
13. Schnabel, F., et al. Tree diversity increases forest temperature buffering via enhancing canopy density and structural diversity // Ecology Letters. 2025. Vol. 28. 11 p.
14. Satosina, E., Mamadiev, N., Makhmudova, L., Kurbatova, Yu., Olchev A. Carbon and heat fluxes during forest restoration in the North Caucasus // Forests. 2023. Vol. 14. No. 12. 18 p.
15. Liu, Z., et al. Temperature constraints of terrestrial ecosystem respiration in global biomes // Functional Ecology. 2025. Vol. 39. P. 2135-2148.
16. Курганова И. Н., Лопес де Гереню В.О., Кузнецов М.А., и др. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. № 5. 16 с.
17. Kolb, S., Haumaier, L., Borken, W. Inhibition of atmospheric methane oxidation by monoterpenes in Norway spruce and European beech soils // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40. P. 3014–3020.
18. Fest, B.J.; Hinko-Najera, N.; Wardlaw, T., et al. Soil methane uptake increases under continuous throughfall reduction in a temperate evergreen, broadleaved eucalypt forest // Ecosystems. 2017. Vol. 20. P. 368–379.
19. Krebs, L., Burri, S., Feigenwinter, I., Gharun, M., Meier, P., Buchmann, N. Forest-floor respiration, N2O fluxes, and CH4 fluxes in a subalpine spruce forest: Drivers and annual budgets // Biogeosciences. 2024. Vol. 21. P. 2005–2028.

© Kochkina M.V. et al., 2026

20. Mo, W., Lee, M., Uchida, M., et al. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan // Agricultural and Forest Meteorology. 2005. Vol. 134. P. 81–94.
21. Maier, M., Paulus, S., Nicolai, C., Stutz, K.P., Nauer, P.A. Drivers of plot-scale variability of CH_4 consumption in a well-aerated pine forest soil // Forests. 2017. Vol. 8. 16 p.
22. Cai, Y., Sawada, K., Hirota, M. Spatial variation in forest soil respiration: A systematic review of field observations at the global scale // The Science of the Total Environment. 2023. Vol. 874. Article 162348.
23. Wu, X., Yao, Z., Brüggemann, N., et al. Effects of soil moisture and temperature on CO_2 and CH_4 soil–atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China // Soil Biology and Biochemistry. 2010. Vol. 42. P. 773–787.

References

1. IPCC. (2023). Climate Change 2023: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press.
2. Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 464, 579–582.
3. Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 440, 165–173.
4. Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 48, 7–20.
5. Wigley, K., Armstrong, C., Smaill, S.J., et al. (2024). Methane cycling in temperate forests. Carbon Balance and Management, 19, Article 37, 20.
6. Walkiewicz, A., Bulak, P., Brzezińska, M., & Bieganowski, A. (2025). Assessment of soil CO_2, CH_4, and N_2O fluxes and their drivers, and their contribution to the climate change mitigation potential of forest soils in the Lublin region of Poland. European Journal of Forest Research, 144, 29–52.
7. Lee, J., Oh, Y., Lee, S.T., et al. (2023). Soil organic carbon is a key determinant of CH4 sink in global forest soils. Nature Communications, 14, Article 3110, 9.
8. Rafalska, A., et al. (2023). Variation in methane uptake by grassland soils in the context of climate change - A review of effects and mechanisms. Science of the Total Environment, 871, 162127.
9. Guo, C., Ke, F., Zhang, L., & Li, S. (2025). Inter-monthly variations in CO_2 and CH4 fluxes in a temperate forest: Coupling dynamics and environmental drivers. Atmosphere, 16, 21.
10. Yang, M., Yu, G., He, N., et al. (2022). Coupling-decoupling of soil CO_2 and CH_4 fluxes and their responses to temperature in arid and semi-arid regions of China. Chinese Journal of Plant Ecology, 46(12), 1497–1507.
11. Gulev, S.K., and Olchev, A.V. (eds.*). Carbon Polygons: Monitoring, Geoinformation Systems, and Carbon Sequestration Technologies*. Moscow: Nauchny Mir Publ., 2025. 420. (in Russ.)
12. Gorbov, S. N., Salnik, N. V., Tagiverdiev, S. S., et al. (2026). Carbon forms and their dynamics in soils of the Carbon Supersite at the Black Sea coast. Soil Systems, 10, Article 4, 18.

© Кочкина М.В. и др., 2026

13. Schnabel, F., et al. (2025). Tree diversity increases forest temperature buffering via enhancing canopy density and structural diversity. Ecology Letters, 28, 11.
14. Satosina, E., Mamadiev, N., Makhmudova, L., Kurbatova, Yu., & Olchev, A. (2023). Carbon and heat fluxes during forest restoration in the North Caucasus. Forests, 14(12), 18.
15. Liu, Z., et al. (2025). Temperature constraints of terrestrial ecosystem respiration in global biomes. Functional Ecology, 39, 2135–2148.
16. Kurganova, I. N., Lopes de Gerenyu, V. O., Kuznetsov, M. A., et al. (2022). Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation. Soils and Environment, (5), 16. (in Russ.)
17. Kolb, S., Haumaier, L., & Borken, W. (2008). Inhibition of atmospheric methane oxidation by monoterpenes in Norway spruce and European beech soils. Soil Biology and Biochemistry, 40, 3014–3020.
18. Fest, B.J.; Hinko-Najera, N.; Wardlaw, T., et al. (2017). Soil methane uptake increases under continuous throughfall reduction in a temperate evergreen, broadleaved eucalypt forest. Ecosystems, 20, 368–379.
19. Krebs, L., Burri, S., Feigenwinter, I., Gharun, M., Meier, P., & Buchmann, N. (2024). Forest-floor respiration, N_2O fluxes, and CH_4 fluxes in a subalpine spruce forest: Drivers and annual budgets. Biogeosciences, 21, 2005–2028.
20. Mo, W., Lee, M., Uchida, M., et al. (2005). Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. Agricultural and Forest Meteorology, 134, 81–94.
21. Maier, M., Paulus, S., Nicolai, C., Stutz, K.P., & Nauer, P.A. (2017). Drivers of plot-scale variability of CH_4 consumption in a well-aerated pine forest soil. Forests, 8, 16.
22. Cai, Y., Sawada, K., & Hirota, M. (2023). Spatial variation in forest soil respiration: A systematic review of field observations at the global scale. The Science of the Total Environment, 874, Article 162348.
23. Wu, X., Yao, Z., Brüggemann, N., et al. (2010). Effects of soil moisture and temperature on CO_2 and CH_4 soil–atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. Soil Biology and Biochemistry, 42, 773–787.

© Kochkina M.V. et al., 2026

УДК 528.8.
DOI: 10.7868/S265867032603008X

Сезонная и межгодовая изменчивость потоков CO_2 и CH_4 на территории России по данным спутников

Мысленков Станислав Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Лямкина Варвара Алексеевна
РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева, г. Москва, Россия
ORCID: 0009-0001-7042-0452; e-mail: var.silvestr@gmail.com

Романюк Валерий Анатольевич
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Аннотация. Проведено исследование межгодовой и сезонной изменчивости содержания и потоков углекислого газа и метана с осреднением по территории Российской Федерации за период 2003–2026 гг. Использованы массивы данных Copernicus и GOSAT разного уровня обработки. По данным GOSAT, среднее содержание XCO_2 для территории России в апреле 2026 года достигло 430,7 ppm. Направление и величина трендов средних значений XCO_2 для территории России совпадает с глобальными оценками. Сезонные колебания содержания XCO_2 превышают 12 ppm. Выполнен анализ среднемесячных значений потоков метана и углекислого газа между океаном/сушей и атмосферой в среднем для территории России. За период с 2009 по 2022 год средний поток CO_2 отрицательный и составляет −0,023 г*С/м^2/сут., но с 2018 года общий годовой баланс потока CO_2 стал положительным. Средний поток CH_4 для России составляет 0,0035 г* CH_4/м^2/сут. Максимальные значения наблюдаются в июле–августе и составляют 0,006–0,007 г* CH_4/м^2/сут.

Ключевые слова: CO_2, CH_4, GOSAT, парниковые газы, мониторинг CO_2

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета (FEFF-2024-0004).

Для цитирования: Мысленков С.А., Лямкина В.А., Романюк В.А. Сезонная и межгодовая изменчивость потоков CO_2 и CH_4 на территории России по данным спутников // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 128–140. DOI: 10.7868/S265867032603008X

Дата поступления в редакцию: 20.07.2026.
Дата принятия к публикации: 18.09.2026.

© Мысленков С.А. и др., 2026

UDC 528.8
DOI: 10.7868/S265867032603008X

Seasonal and interannual variability of CO_2 and CH_4 fluxes in Russia based on satellite data

Stanislav A. Myslenkov
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-7700-4398; e-mail: stasocean@gmail.com

Varvara A. Lyamkina
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0001-7042-0452; e-mail: var.silvestr@gmail.com

Valery A. Romanyuk
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ORCID: 0000-0002-9993-7965; e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Abstract. A study was conducted to examine the interannual and seasonal variability of the content and fluxes of carbon dioxide and methane, averaged over the territory of the Russian Federation for the period 2003–2026. Data arrays from Copernicus and GOSAT at different levels of processing were used. According to GOSAT data, the average XCO_2 content for the territory of Russia in April 2026 reached 430.7 ppm. The direction and magnitude of the trends in the average XCO_2 values for the territory of Russia coincide with global estimates. Seasonal fluctuations in the XCO_2 content exceed 12 ppm. An analysis has been carried out of the average monthly values of the methane and carbon dioxide fluxes for the territory of Russia. On average, over the period from 2009 to 2022, the CO_2 flux is −0.023 g*C/m^2/day, but since 2018 the overall annual balance of the CO_2 flux has become positive. The average CH_4 flux for Russia is 0.0035 g*CH_4/m^2/day. The maximum values are observed in July–August and amount to 0.006–0.007 g*CH_4/m^2/day.

Keywords: CO_2, CH_4, GOSAT, greenhouse gases, CO_2 monitoring

Acknowledgments. The study was funded within the framework the state assignment of Sakhalin State University (FEFF-2024-0004).

For citation: Myslenkov S.A., Lyamkina V.A., Romanyuk V.A. (2026). Seasonal and interannual variability of CO_2 and CH_4 fluxes in Russia based on satellite data. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3,* 128–140. doi: 10.7868/S265867032603008X (in Rus.).

Received: 20.07.2026.
Accepted: 18.09.2026.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Введение

Метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2) — это одни из основных парниковых газов, которые удерживают тепло в атмосфере Земли, что называется парниковым эффектом. В связи с увеличением выбросов парниковых газов в атмосферу во многих районах Земли наблюдается устойчивый рост температуры воздуха и температуры воды в океане, которые приводят к различным климатическим изменениям [1].

Мониторинг содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере является крайне важной задачей в контексте анализа и прогноза изменений климата. Мониторинг этих газов осуществляется, как правило, при помощи наземных станций или дистанционных спутниковых наблюдений [1, 2]. Спутниковые данные имеют глобальный охват, что позволяет их использовать для анализа пространственно-временной изменчивости содержания парниковых газов как на глобальном, так и на региональном масштабах [3].

В настоящее время функционируют следующие спутниковые миссии, в рамках которых ведется измерение содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере: OCO-2/OCO-3 (CO_2), GOSAT/GOSAT-2 (CO_2, CH_4), TROPOMI/Sentinel-5P (CH_4) [3, 4]. Сопоставление спутниковых данных с измерениями на наземных станциях показывает хорошее качество спутниковых данных при достаточном временном и пространственном осреднении [5, 6].

В 2021 году в России стартовал масштабный проект «Карбоновые полигоны России» [7, 8]. Также в разных регионах России функционируют станции мониторинга RuFlux [9]. На карбоновых полигонах и станциях мониторинга проводится широкий комплекс исследований функционирования экосистем, включая оценки эмиссии и поглощения парниковых газов. Некоторые результаты оценки содержания и потоков CO_2 и CH_4 представлены в работах [7, 9–14]. Результаты измерений в различных регионах России показывают присутствие высокой пространственной и временной изменчивости содержания и потоков CO_2.

В данном контексте возникает необходимость получения осредненных фоновых оценок содержания и потоков парниковых газов непосредственно для территории России. Данные фоновые оценки необходимы для сравнения с региональными оценками на конкретных станциях в различных ландшафтах и экосистемах. Глобальные оценки содержания CO_2, CH_4 с осреднением по всему земному шару проводятся непрерывно, и анализу этих данных посвящено множество публикаций [2]. Исследование межгодовой изменчивости и сезонной динамики содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере юга Западной Сибири представлено в работе [15]. Однако, для всей территории России такие оценки носят единичный характер [4].

Целью работы является анализ среднего содержания и потоков CO_2 и CH_4 на территории России по спутниковым данным.

© Мысленков С.А. и др., 2026

1. Данные и методы

Для анализа содержания CO_2 в атмосфере использовались данные портала Copernicusдоступные по адресу https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/satellite-carbon-dioxide. Использовался массив значений интегрального по вертикали содержания углекислого газа в толще атмосферы (XCO_2) с разрешением по пространству 5x5° и с шагом по времени 1 месяц за период с 2003 по 2023 год. Массив данных Copernicus получен на основе объединения и обработки измерений спутников SCIAMACHY/ENVISAT, TANSO-FTS/GOSAT, TANSO-FTS2/GOSAT2, OCO-2, OCO-3. Данные имеют глобальный охват, однако, в некоторых ячейках они отсутствуют из-за сильной облачности или недостаточного солнечного излучения (в зимний период в приполярных районах).

Также в работе были использованы некоторые продукты обработки данных спутника GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite). Описание данных и сервис для их загрузки представлены на сайте https://data2.GOSAT.nies.go.jp/doc/doc_tech_en.html. Использовался массив GOSAT XCO_2 третьего уровня обработки (L3 global CO_2 distribution (SWIR)), представляющий собой преобразованные данные измерений со спутника с интерполяцией на сетку 2,5° и осреднением за месяц. Данные охватывают период с 2009 по 2026 год. В некоторых ячейках значения отсутствуют по тем же причинам, что и в массиве Copernicus.

Для анализа содержания CO_2 в приземном слое и потоков парниковых газов использованы данные GOSAT четвертого уровня обработки, основанные на измерениях со спутника и результатах расчетов по атмосферной модели. Содержание CO_2 в атмосфере получено по данным массива «L4B global CO_2 distribution». Этот массив содержит данные с разрешением по пространству 2,5x2,5°, с шагом по времени 6 часов, на 17-ти уровнях по вертикали за период с июня 2009 по октябрь 2022 года.

Потоки метана и углекислого газа между океаном/сушей и атмосферой получены из массивов «L4A global CO_2» и «L4A global CH_4». Данные о потоках представлены на сетке 1x1°, с шагом по времени 1 месяц за период с июня 2009 по октябрь 2022 года. Массив данных L4A содержит информацию о потоках обусловленный сжиганием ископаемого топлива и производством цемента, сжиганием биомассы, процессами в биосфере, обменом океана и атмосферы. В данной работе для анализа использовались данные только оптимизированных общих потоков. Данные четвертого уровня обработки имеются в каждом узле сетки круглый год без пропусков.

Все используемые массивы имеют глобальный охват по пространству. Данные о содержании CO_2 и потоках парниковых газов осреднялись по пространству для всего земного шара, а также отдельно для территории России с включением дополнительно 400 км акватории морей, омывающих Россию.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Границы, используемые для осреднения по пространству представлены на рис. 1. Данная граница во многом является условной, однако, учитывая значительную роль океана в процессах поглощения и эмиссии парниковых газов, представляется более корректным добавлять к территории суши и некую часть океана.

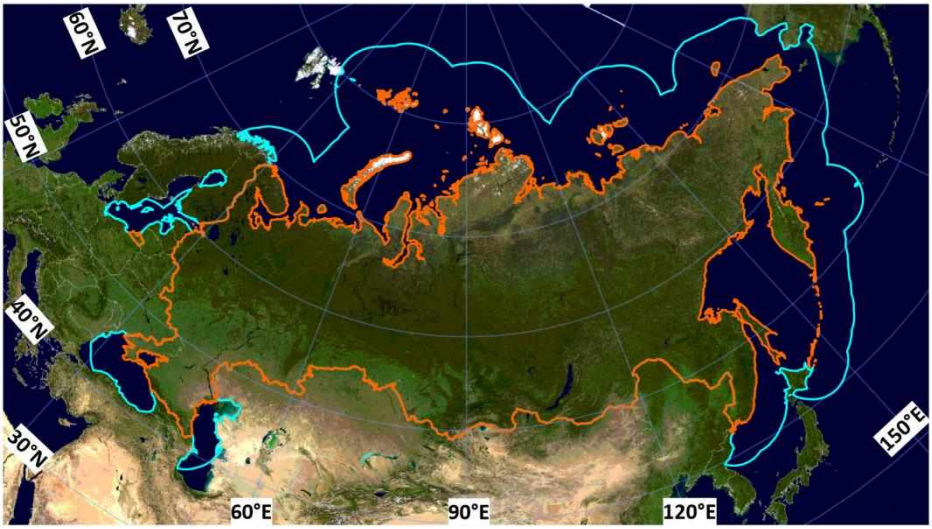


Рис. 1. *Границы области осреднения содержания и потоков парниковых газов. Оранжевой линией обозначены сухопутные границы РФ, голубой линией – граница акватории 400 км*

Единицы измерения для содержания CO_2 – ppm, для потоков CO_2 в граммах С/м^2/сут (gC m^{-2} day^{-1}), а для метана в граммах CH_4/м^2/сут (gCH_4 m^{-2} day^{-1}). Положительные значения потоков указывают на эмиссию, а отрицательные – на поглощение газов.

Расчет содержания углекислого газа и метана в атмосфере при помощи датчиков, установленных на спутниках, производится косвенным образом, на основе данных о рассеянии и поглощении солнечного излучения в атмосфере [16]. Наличие облачности существенно ограничивает качество спутниковых данных. На территориях за полярным кругом в зимний период данные спутниковых измерений также отсутствуют и в результате в массивах Copernicusи GOSAT L3 XCO_2 при осреднении для территории России данные есть всего в нескольких ячейках. Данные GOSAT L4, используемые в данной работе, доступны в течение всего года и в том числе в полярных районах. Однако, во многом это результат математического моделирования и для

© Мысленков С.А. и др., 2026

некоторых районов практически без усвоения спутниковых измерений. Оценка качества спутниковых данных весьма затруднительна ввиду крайне малого количества данных прямых измерений, поэтому в этой работе спутниковые данные используются без каких-либо корректировок.

2. Результаты

На первом этапе было выполнено сопоставление содержания XCO_2 с ежемесячным осреднением по всему земному шару на основании разных массивов данных за период с 2003 по 2023 год для данных Copernicus и с 2009 по 2026 год по данным GOSAT (рис. 2).

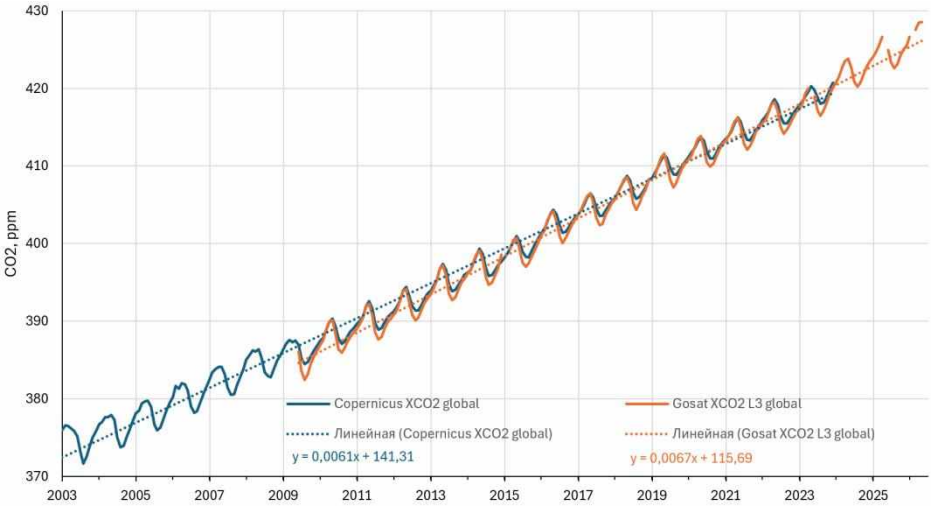


Рис. 2. *Среднее содержание XCO_2 по всему земному шару по данным Copernicus и GOSAT L3*

Среднее содержание XCO_2 по данным Copernicus в целом хорошо согласуется с данными GOSAT, коэффициент корреляции составляет 0,99. Однако, по данным Copernicuscодержание XCO_2 во время летних минимумов стабильно больше примерно на 0,8–1,2 ppm. В основе обоих массивов лежат данные GOSAT на большей части исследуемого периода, однако, используемые алгоритмы обработки и методы осреднения, возможно, являются причиной такого расхождения. Тренды положительные и каждый год идет увеличение содержания XCO_2 примерно на 2 ppm. Наклон трендовых линий в целом совпадает, хотя рост содержания XCO_2 по данным GOSAT идет быстрее.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

Возможно, это связано с тем, что в период с 2003 по 2009 массив Copernicus основан на данных спутника SCIAMACHY/ENVISAT, имеющего другой сенсор, охват, орбиту и, следовательно, разнородные данные могут вызывать изменение тренда. В целом можно утверждать, что используемые массивы согласованы, хотя и имеют некие отличия в абсолютных значениях.

Далее рассмотрим осредненные значения содержания XCO_2 для территории России (рис. 3), в границах, обозначенных на рис. 1. Направление и величина трендов для территории России совпадает с глобальными оценками. Однако, размах сезонной изменчивости существенно больше: по данным GOSAT, сезонные колебания превышают 12 ppm, тогда как для глобального осреднения они в два раза меньше. По данным Copernicus видно некое изменение амплитуды сезонных колебаний в 2008–2009 года, что совпадает с дополнением данных SCIAMACHY/ENVISAT данными спутника GOSAT. По данным GOSAT, среднее содержание XCO_2 для территории России в апреле 2026 года достигло 430,7 ppm, следовательно, учитывая существующую тенденцию, весной 2027 года можно ожидать значений около 433–434 ppm.

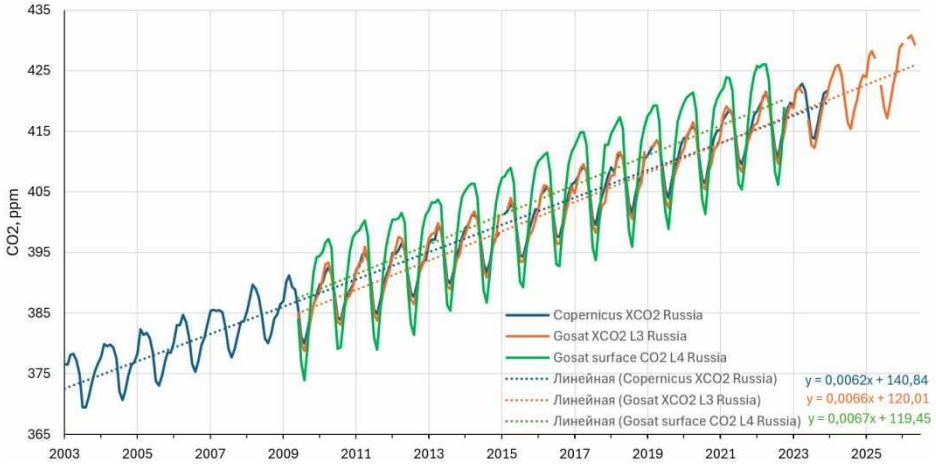


Рис. 3. *Среднее содержание XCO_2 для России по данным Copernicus и GOSAT L3 и содержание CO_2 в приземном слое (surface) по данным GOSAT L4*

В изменении содержания CO_2 в приземном слое по данным GOSAT L4 для территории России нужно отметить еще больший размах сезонных колебаний – до 20 ppm в последние годы (рис. 3). Также заметно, что фаза ежегодного увеличения содержания CO_2 в приземном слое смещается на период январь-апрель в отличие от динамики XCO_2.

© Мысленков С.А. и др., 2026

На следующем этапе был выполнен анализ потоков CO_2 и CH_4 по данным спутника GOSAT для территории России за период с июня 2009 по май 2022 года (рис. 4). Положительные значения потоков указывают на эмиссию, а отрицательные на поглощение CO_2. В среднем для территории России за период с 2009 по 2022 год поток CO_2 составляет −0,023 г*С/м^2/сут. Минимальные значения наблюдаются в июне-июле и составляют −0,8 – −1 г*С/м^2/сут. С сентября по апрель значения, как правило, положительные в диапазоне 0,2–0,4 г*С/м^2/сут. Общий тренд положительный. Приблизительно с 2018 года общий годовой баланс стал положительным.

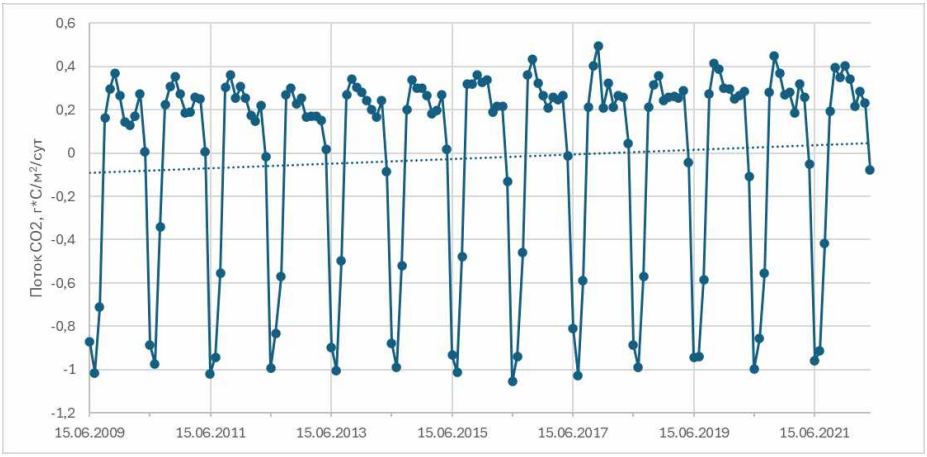


***Рис. 4**. Общий поток CO_2 для территории России по данным GOSAT с июня 2009 по май 2022 года*

В работе [17] подобный анализ потоков CO_2 по данным GOSAT был выполнен только для территории суши (без прилегающих акваторий) и летние минимумы потока CO_2 доходили до −1,8 г*С/м^2/сут, а летние максимумы до 0,5–0,8 г*С/м^2/сут, что указывает на сглаживающее влияние океана, при включении прибрежных акваторий при пространственном осреднении.

Изменение потока CH_4 для территории России за период с июня 2009 по май 2021 года представлено на рис. 5. В среднем для территории России за период с 2009 по 2021 год поток CH_4 составляет 0,0035 г*CH_4/м^2/сут. Максимальные значения наблюдаются в июле-августе и составляют 0,006–0,007 г*CH_4/м^2/сут. Общий тренд нейтральный, хотя с 2016 года летние максимумы несколько выросли.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

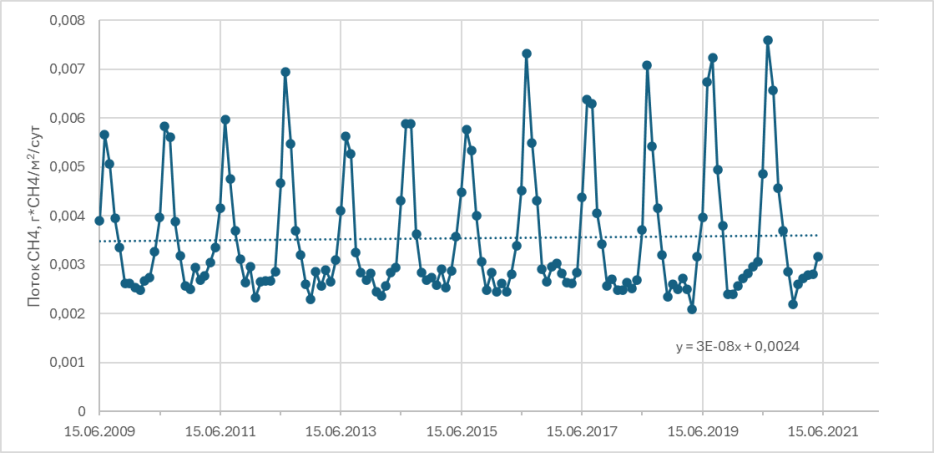


Рис. 5. *Общий поток CH_4 для территории России по данным GOSAT с июня 2009 по май 2021 года*

Данные о потоках парниковых газов вероятно содержат ошибки, связанные как с определением XCO_2 по спутниковым данным, так и с ошибками в используемых атмосферных моделях. Тем не менее существующие оценки точности продуктов GOSAT на основе сопоставления с данными наземных станций и развитие атмосферных моделей позволяют надеяться, что получаемые результаты, получаемые с достаточно большим пространственно-временным осреднением, близки к реальности [4, 6, 18–21].

Заключение

На основе массивов Copernicus и GOSAT были получены оценки содержания XCO_2 в атмосфере для глобального покрытия и отдельно для территории России с 2003 по 2026 год. Выполнено сопоставление данных из разных источников. Показано, что для глобального покрытия массивы XCO_2 по данным Copernicus и GOSAT хорошо коррелируют, но по данным Copernicus содержание XCO_2 во время летних минимумов больше на ~0,8–1,2 ppm. Многолетний тренд устойчивый: содержание XCO_2 ежегодно увеличивается примерно на 2 ppm. Наклон трендовых линий по данным из разных источников в целом совпадает, хотя рост содержания XCO_2 GOSAT идет быстрее.

По данным GOSAT, среднее содержание XCO_2 для территории России в апреле 2026 года достигло 430,7 ppm, следовательно, учитывая существующую тенденцию, весной 2027 года можно ожидать значений около 433–434 ppm.

Направление и величина трендов содержания XCO_2 для территории России согласуется с глобальными оценками. Однако, размах сезонных колебаний для

© Мысленков С.А. и др., 2026

России существенно больше и может превышать 12 ppm (по данным GOSAT). В изменении содержания CO_2 в приземном слое по данным GOSAT L4 для территории России нужно отметить еще больший размах сезонных колебаний – до 20 ppm в последние годы.

В среднем для территории России за период с 2009 по 2022 год поток CO_2 составляет −0,023 г*С/м^2/сут. Минимальные значения наблюдаются в июне-июле и составляют −0,8 – −1 г*С/м^2/сут. Общий тренд положительный, а с 2018 года общий годовой баланс потока CO_2 стал положительным.

Средний поток CH_4 для России за период с 2009 по 2021 год составляет 0,0035 г*CH_4/м^2/сут. Максимальные значения наблюдаются в июле–августе и составляют 0,006–0,007 г*CH_4/м^2/сут. Общий тренд нейтральный, хотя с 2016 года летние максимумы несколько выросли.

Полученные оценки могут быть использованы в качестве фоновых значений для территории России для различных научных и прикладных задач.

Литература

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2023.
2. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., et al. Global Carbon Budget 2025 // Earth System Science Data. 2026. No. 18. P. 3211–3288.
3. Hu K. et al. Review of satellite remote sensing of carbon dioxide inversion and assimilation // Remote Sensing. 2024. V. 16. №. 18. P. 3394.
4. Ольчев А.В. Оценка эмиссии и поглощения диоксида углерода и метана поверхностью суши и океана в 21 веке // Фундаментальная и прикладная климатология. 2025. Т. 11. № 3. С. 374–438.
5. Гаврилов Н. М., Гаврилов Н. М., Тимофеев Ю. М. Сравнения спутниковых (GOSAT) и наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 вблизи Санкт-Петербурга // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 43.
6. Qu Y., C. Zhang, D. Wang et al. Comparison of atmospheric CO_2 observed by GOSAT and two ground stations in China // International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34.No. 11. P. 3938–3946.
7. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Под редакцией С.К. Гулева и А.В. Ольчева – Москва: Научный мир, 2025. 420 с.
8. Aivazyan M. M. Carbon polygons (supersites) chain in the Russian Federation // Ecobiotech. 2025. Vol. 8. No. 2. P. 261–283.
9. Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87(4). С. 512–535.
10. Полухин А. А., Мурзакова Ю. В., Пронина Ю. О. и др. Годовая изменчивость потока CO_2 на карбоновом полигоне в северо-восточной части Чёрного моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2026. Т. 526. № 2. С. 408–418.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

11. Голеусов П.В. Результаты мониторинга концентрации и потоков углекислого газа в г. Белгороде (2023–2024 гг.) // Региональные геосистемы. 2025. Т. 49. № 3. С. 462–476.
12. Napreenko M., Kileso A., Napreenko-Dorokhova T. et al. Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. Vol. 22. P. 11267–11274.
13. Никулина И.В., Мысленков С.А., Латковская Е.М., Пищальник В.М. Штормовые выбросы макрофитов в прибрежной зоне залива Анива: пространственная структура, состав и эмиссионный потенциал // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2026. № 4. С. 107–120.
14. Кочкина М. В., Карпунина Д. А., Леонова Д. С. и др. Сезонная и суточная изменчивость потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края // Юг России: экология, развитие. 2026. Т. 21. № 2(79). С. 114–124.
15. Мордвин Е. Ю., Сергиенко Д. С., Лагутин А. А. Полное содержание CO_2 и CH_4 в атмосфере юга западной Сибири по данным спутников GOSAT и GOSAT-2 // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1(147). С. 42–49.
16. Лукьянов А.К. Математические методы и алгоритмы восстановления общего содержания CO_2 по данным спутникого прибора GOSAT. Томск, 2015
17. Сильвестрова В. А., Мысленков С. А. Особенности годового хода и пространственного распределения потоков CO_2 и CH_4 на территории России по данным спутника GOSAT // Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике: сборник докладов Школы молодых ученых, Москва, 21–22 ноября 2024 года. – Москва.
18. Jiang F. et al. Regional CO_2 fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO_2 retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System //Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. №. 3. P. 1963–1985.
19. Cao L. et al. The temporal and spatial distributions of the near-surface CO_2 concentrations in Central Asia and analysis of their controlling factors // Atmosphere. 2017. V. 8. №. 5. P. 85.
20. Wang J. S., Kawa S. R., Collatz G. et al.A global synthesis inversion analysis of recent variability in CO_2 fluxes using GOSAT and in situ observations // Atmos. Chem. Phys. 2018. №18. P. 11097–11124.
21. Saeki T. et al. Inverse modeling of CO_2 fluxes using GOSAT data and multi-year ground-based observations // Sola. 2013. V. 9. P. 45–50.

References

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2023.
2. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., et al. (2026) Global Carbon Budget 2025. *Earth System Science Data*, 18, 3211–3288.
3. Hu, K. et al. (2023). Review of satellite remote sensing of carbon dioxide inversion and assimilation. *Remote Sensing*, 16, 18, 3394.
4. Ol'chev, A.V. (2025). Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 11, 3, 374–438 (in Russ.)

© Мысленков С.А. и др., 2026

5. Gavrilov, N. M., Gavrilov, N. M., Timofeev, YU. M. (2013). Sravneniya sputnikovyh (GOSAT) i nazemnyh spektroskopicheskih izmerenij soderzhaniya so2 vblizi Sankt-Peterburga. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 6, 43.
6. Qu, Y., C. Zhang, D. Wang, et al. (2013). Comparison of atmospheric CO_2 observed by GOSAT and two ground stations in China. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34, 11, 3938–3946.
7. Karbonovye poligony: monitoring, geoinformacionnye sistemy, sekvestracionnye tekhnologii. Pod redakciej S.K. Gulevai A.V., Ol'cheva – Moskva: Nauchnyjmir, 2025. 420 s (in Russ.)
8. Aivazyan, M. M. (2025). Carbon polygons (supersites) chain in the Russian Federation. *Ecobiotech*, 8, 2, 261–283.
9. Kuricheva, O.A., Avilov, V.K., Varlagin, A.V. i dr. (2023). Monitoring ekosistemnyh potokov parnikovy hgazov na territorii rossii: set' RuFlux. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 87(4), 512–535.
10. Poluhin, A. A., Murzakova, YU. V., Pronina, YU. O. i dr. (2026). Annual Variability of CO_2 Flux at the Carbon Polygon in the Northeastern Black Sea. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle, 526, 2, 408–418 (in Russ.).
11. Goleusov, P.V. (2025).Rezul'taty monitoring koncentracii i potokov uglekislogo gaza v g. Belgorode (2023–2024 gg.). *Regional'nye geosistemy*, 49, 3, 462–476.
12. Napreenko, M., Kileso, A., Napreenko-Dorokhova, T. et al. (2025). Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region. International Journal of Environmental Science and Technology, 22, 11267–11274.
13. Nikulina, I.V., Myslenkov, S.A., Latkovskaya, E.M., Pishchal'nik, V.M. (2026). Shtormovye vybrosy makrofitov v pribrezhnoj zone zaliva Aniva: prostranstvennaya struktura, sostav i emissionnyj potencial. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 4, 107–120.
14. Kochkina, M. V., Karpunina, D. A., Leonova, D. S. i dr. (2026). Seasonal and daily variability of CO_2 and CH_4 fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia. *YUgRossii: ekologiya, razvitie*, 21, 2(79), 114–124 (in Russ.).
15. Mordvin, E. YU., Sergienko, D. S., Lagutin, A. A. (2026). Polnoe soderzhanie CO_2 i CH_4 v atmosphere yugazapadnoj Sibiri po dannym sputnikov GOSAT i GOSAT-2. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1(147), 42-49.
16. Luk'yanov, A.K. Matematicheskie metody I algoritmy vosstanovleniya obshchego soderzhaniya CO_2 po dannym sputnikogo pribora GOSAT. Tomsk, 2015
17. Sil'vestrova, V.A., Myslenkov, S.A. (2024). Osobennosti godovogo hoda I prostranstvennogo raspredeleniya potokov CO_2 i CH_4 na territorii Rossii po dannym sputnika GOSAT. *Rol' vozobnovlya emojenergetiki pri perekhode k uglerod-nejtral'noj ekonomike: sbornik dokladov SHkoly molodyh uchenyh*, Moskva, 21–22 noyabrya 2024 goda. – Moskva.
18. Jiang, F. et al. (2021). Regional CO_2 fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO $_2$ retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21, 3, 1963–1985.
19. Cao, L. et al. (2017). The temporal and spatial distributions of the near-surface CO_2 concentrations in Central Asia and analysis of their controlling factors. *Atmosphere*, 8, 5, 85.

© Myslenkov S.A. et al., 2026

20. Wang, J. S., Kawa, S. R., Collatz, G. et al. (2018). A global synthesis inversion analysis of recent variability in CO_2 fluxes using GOSAT and in situ observations. *Atmos. Chem. Phys*, 18, 11097–11124.
21. Saeki, T. et al. (2013). Inverse modeling of CO_2 fluxes using GOSAT data and multi-year ground-based observations, *Sola*, 9, 45–50.

© Мысленков С.А. и др., 2026

УДК 551.583:574.4:504.7
DOI: 10.7868/S2658670326030091

Национальный суверенитет в моделировании углеродного баланса России

Соловьев Дмитрий Александрович
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-5591-3067; e-mail: solovev@ocean.ru

Аннотация. Рассматривается переход от использования универсальных коэффициентов Межправительственной группы экспертов по изменению климата к национальным, эмпирически обоснованным коэффициентам и пространственно детализированным данным как ключевой элемент научно-методического суверенитета России в оценке углеродного и парникового баланса. Показано, что данный переход не означает отказа от методологии МГЭИК: напротив, он соответствует логике перехода от Tier 1 к более высоким уровням Tier 2–Tier 3, предусматривающим использование страновых коэффициентов, национальных наблюдений и моделей. Базовое балансовое соотношение разделяет итоговый нетто-поток на антропогенные, природные источники и поглощение.Итоговая оценка зависит не только от хозяйственных выбросов, но и от природных эмиссий и поглотительной способности экосистем. Обсуждается роль российских бореальных лесов, болот, почв и других экосистем как крупного поглощающего компонента, а также необходимость независимой верификации баланса посредством сочетания bottom-up наблюдений, top-down атмосферных инверсий, дистанционного зондирования и национальных моделей. Предложена архитектура национальной системы углеродного учёта, основанная на принципах наблюдаемости, воспроизводимости, пространственной детализации, верифицируемости и международной сопоставимости.

Ключевые слова: углеродный баланс, парниковые газы, национальные коэффициенты, МГЭИК, Tier 1, Tier 2, Tier 3, CO_2, CH_4, N_2O, поглощение углерода, бореальные леса, болота, почвы, кадастр парниковых газов, климатический мониторинг, научный суверенитет.

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

Для цитирования: Соловьев Д.А. Национальный суверенитет в моделировании углеродного баланса России // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 141–146. DOI: 10.7868/S2658670326030091.

Дата поступления в редакцию: 30.08.2026
Дата принятия к публикации: 20.09.2026

© Solovyev D.A., 2026

UDC 551.583:574.4:504.7
DOI: 10.7868/S2658670326030091

National Sovereignty in Modeling Russia's Carbon Balance

Dmitry A. Solovyev
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-5591-3067; e-mail: solovev@ocean.ru

Abstract. The paper examines the transition from universal IPCC default factors to country-specific empirically validated coefficients and spatially resolved observations as a key element of Russia's scientific and methodological sovereignty in greenhouse-gas accounting. This transition is interpreted not as a rejection of IPCC methodology but as a move from Tier 1 to Tier 2–Tier 3 approaches. The national balance is represented through separate anthropogenic and natural source terms and an ecosystem sink term. The paper discusses the role of boreal forests, wetlands and soils, as well as the need for independent verification through combined bottom-up observations, top-down atmospheric inversions, remote sensing and national models. A conceptual architecture of a sovereign but internationally interoperable carbon accounting system is proposed.

Keywords: carbon balance, greenhouse gases, country-specific emission factors, IPCC, Tier 1, Tier 2, Tier 3, CO_2, CH_4, N_2O, carbon sink, boreal forests, wetlands, soils, greenhouse-gas inventory, climate monitoring, scientific sovereignty.

Acknowledgments. 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).

For citation: Solovyev D.A. (2026). National sovereignty in modeling Russia's carbon balance. *Journal of Environmental Earth and Energy Study, 3,* 141–156. doi: 10.7868/S2658670326030091 (in Russ.).

Received: 30.08.2026.
Accepted: 20.09.2026.

Введение

Количественная оценка выбросов и поглощения парниковых газов стала частью климатической политики, экономического планирования и международной отчётности. Для России достоверность такого баланса особенно зависит от качества национальных параметров: огромная территория объединяет

© Соловьев Д.А., 2026

бореальные леса, болота, многолетнюю мерзлоту, почвы с крупными запасами органического углерода и технологически неоднородные отрасли. Наблюдаемые климатические изменения в России и мире дополнительно делают эти параметры нестационарными [1; 2; 3; 4].

Методология МГЭИК предусматривает последовательный переход от универсальных коэффициентов Tier 1 к страновым коэффициентам Tier 2 и национальным моделям Tier 3 [5; 6]. Поэтому использование российских наблюдений следует рассматривать не как отказ от международной системы, а как повышение её эмпирической обоснованности. Первый этап ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» создал для такого перехода новую наблюдательную и модельную базу; второй этап на 2026– 2030 гг. закреплён государственными дорожными картами [7; 8; 9; 10].

Ключевой результат состоит в том, что пространственная и биогеохимическая специфика страны существенно влияет на итоговую оценку нетто-потока. В рамках проекта построены комплексные карты потоков CO_2, CH_4 и N_2O, обновлены пересчётные коэффициенты и национальный кадастр [7; 8]. Независимый реанализ бюджета российских экосистем также подтверждает значимый сток CO_2 при существенной неопределённости отдельных компонентов [11]. Это делает национальную параметризацию самостоятельной научной задачей, связанной с углеродным циклом, океаном и климатической системой в целом [2; 12; 13; 14].

Цель работы — сформулировать компактную методологическую схему национального суверенитета в моделировании углеродного баланса: от перехода Tier 1 → Tier 2–Tier 3 к пространственным полям потоков, независимой верификации и интеграции с национальной моделью Земной системы. Под суверенитетом понимается способность самостоятельно получать данные, оценивать коэффициенты и неопределённости, воспроизводить расчёт и сопоставлять его с независимыми методами при сохранении международной совместимости.

Методологический переход и структура национального баланса

Для антропогенной составляющей базовая схема инвентаризации связывает показатель активности с коэффициентом выброса. В общем виде:

$$E_{anth} = \sum A_i \, EF_i$$

где E_{anth} — суммарные антропогенные выбросы; A_i — показатель активности для категории i (например, объём сожжённого топлива, выпуск продукции или площадь землепользования); EF_i — соответствующий коэффициент выброса (emission factors) . Tier 1 использует дефолтные коэффициенты МГЭИК, Tier 2 — страновые коэффициенты, учитывающие состав топлива, технологии и

© Solovyev D.A., 2026

национальную статистику, а Tier 3 — прямые измерения, пространственные модели и более детальные данные [5; 6]. Для России это особенно важно в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве и землепользовании; современные национальные оценки антропогенных потоков подтверждают необходимость секторной детализации [15].

Итоговый национальный баланс должен включать не только хозяйственные выбросы, но и природные источники и поглощение. При положительном знаке источников и положительном S как величине стока:

$$E_{net} = E_{anth} + E_{natural} - S$$

где E_{net} — итоговый чистый поток парниковых газов в атмосферу; $E_{natural}$ — суммарные природные эмиссии в принятых границах системы; S — поглощение экосистемами, заданное положительной величиной и поэтому вычитаемое из суммы источников.

Следовательно, итоговый баланс чувствителен одновременно к трём группам параметров. Для сопоставления прежней и новой методик изменение оценки целесообразно представить в виде:

$$\Delta E_{net} = \Delta E_{EF} + \Delta E_{N} - \Delta S$$

где $\Delta E_{net} = E_{net,new} - E_{net,old}$ — изменение итоговой оценки; ΔE_{EF} — изменение антропогенной составляющей, обусловленное заменой дефолтных или ранее применявшихся коэффициентов выбросов и пересчёта на национальные при фиксированной согласованной базе данных активности; ΔE_N — изменение оценки природных эмиссий; $\Delta S = S_{new} - S_{old}$ — изменение поглощения. Знак «−» перед ΔS отражает принятую конвенцию: увеличение стока уменьшает E_{net}. Такая декомпозиция необходима потому, что один и тот же суммарный сдвиг E_{net} может возникнуть при разных сочетаниях уменьшения антропогенных коэффициентов, изменения природных эмиссий и уточнения экосистемного поглощения. Итоговые материалы ВИП ГЗ сообщают об уточнении 22 пересчётных коэффициентов и существенном изменении чистого баланса, но не приводят раздельный количественный вклад этих трёх составляющих [7; 8]. Поэтому результат пересчёта следует трактовать как системный эффект национализации параметров.

Таблица 1. *Сопоставление уровней методологии МГЭИК и национальной системы оценки*

Уровень	**Исходные данные**	**Коэффициенты и модели**	**Научный смысл для России**
Tier 1	Агрегированные данные активности	Дефолтные коэффициенты МГЭИК	Базовая сопоставимость; повышенная структурная неопределённость для неоднородных экосистем и технологий

© Соловьев Д.А., 2026

Уровень	Исходные данные	Коэффициенты и модели	Научный смысл для России
Tier 2	Национально детализированные данные	Страновые коэффициенты	Учёт состава топлива, технологий, природных зон, национальных практик и статистики
Tier 3	Наблюдательные сети, ГИС, дистанционное зондирование, модели	Национальные модели, прямые измерения, пространственно распределённые коэффициенты	Верифицируемый пространственный баланс, возможность независимого анализа источников и поглотителей
Интегрированная система	Совмещение Tier 2–Tier 3 и независимых методов	Bottom-up + top-down + модели Земной системы	Научно-методический суверенитет при сохранении международной совместимости

2. Национальная эмпирическая база: карты потоков и поглотительная способность

Переход к Tier 2–Tier 3 требует измерительной инфраструктуры, способной заменить глобально усреднённые значения национально репрезентативными данными. ВИП ГЗ объединил наблюдения атмосферы, наземных экосистем, морей и океана, карбоновые полигоны, кадастровые процедуры и моделирование [7; 10; 16]. Пространственная детализация особенно важна для России, где лесной сток, болотные CH_4-потоки, почвенные N_2O-эмиссии, пожары и мерзлотные процессы распределены крайне неоднородно.

Комплексные карты CO_2, CH_4 и N_2O позволяют перейти от единственного национального числа к полю источников и поглотителей. Многогазовый подход необходим потому, что поглощение CO_2 лесами или торфонакоплением может частично компенсироваться эмиссией CH_4 и N_2O. Системный реанализ российских наземных экосистем показал согласование bottom-up и top-down оценок CO_2 в пределах неопределённостей и одновременно выявил расхождения по трендам и отдельным компонентам [11]. Глобальный углеродный бюджет также показывает, что независимая проверка региональных потоков является необходимым условием замыкания мирового баланса [14].

Для диагностического описания компенсационной функции экосистем можно использовать коэффициент буферной ёмкости β:

$$\beta = \frac{S}{E_{anth} + E_{natural}}$$

© Solovyev D.A., 2026

где β — диагностический коэффициент буферной ёмкости экосистем; S — поглощение; $E_{anth} + E_{natural}$ — сумма положительных антропогенных и природных потоков в той же пространственно-временной границе. При $0 < \beta < 1$ поглотители компенсируют часть положительных потоков, а $\beta = 1$ соответствует их полной компенсации. Показатель не является официальной метрикой МГЭИК и должен использоваться только при согласованных единицах и полном учёте газов. Его значение динамично: пожары, засухи, деградация мерзлоты и изменение управления экосистемами способны менять как источники, так и поглощение [1; 11; 16]. Поэтому национальные коэффициенты должны регулярно переоцениваться, а не превращаться в новую неизменную систему «дефолтов».

Существенный количественный эффект демонстрирует пересчёт, приведённый в материалах ВИП ГЗ: оценка чистых выбросов изменена с 1650 до 911 условных единиц. Для сопоставления масштабов изменения используем относительное снижение δ, определяемое формуло:

$$\delta = \frac{E_{net}^{old} - E_{net}^{new}}{E_{net}^{old}} \times 100\%$$

Здесь E_{net}^{old} и E_{net}^{new} — соответственно прежняя и новая оценки чистого потока, а δ — относительное снижение расчётной оценки. Полученное значение δ около 44,8 % характеризует изменение научной оценки, а не физическое сокращение выбросов в момент пересчёта. Иными словами произошло повышение точности их оценки за счёт более адекватного учёта российских природных и технологических условий. Новая методика лучше учитывает российскую специфику: национальные коэффициенты выбросов, природные источники, а также поглощение углерода лесами, почвами, болотами и другими экосистемами. Дефолтные коэффициенты МГЭИК остаются корректным базовым инструментом при дефиците данных [5; 6]; национальные параметры имеют преимущество только при документированной выборке, области применимости, оценке неопределённости и независимой проверке.

Высокоразрешающее картографирование меняет сам способ проверки национального баланса. Для каждой пространственной ячейки можно отдельно хранить потоки CO_2, CH_4 и N_2O, их сезонность и неопределённость, а затем агрегировать их до природной зоны, субъекта Федерации или страны. Если topdown инверсия показывает расхождение интегрального потока, пространственная структура позволяет искать его источник — например, недоучёт болотного CH_4, пожаров, почвенного дыхания или сельскохозяйственного N_2O. В системе с единым усреднённым коэффициентом такая диагностика практически невозможна [11; 15].

© Соловьев Д.А., 2026

Особое значение имеет различие между запасом и потоком углерода. Большой запас органического вещества в почвах, мерзлоте или торфе не равнозначен высокому текущему поглощению: при изменении гидрологического режима, пожаре или протаивании резервуар может стать источником. Поэтому национальная система должна одновременно оценивать текущий S и устойчивость соответствующих запасов. Это особенно важно в условиях наблюдаемого потепления на территории России и роста климатической изменчивости [1; 2; 4].

Карбоновые полигоны и длительные экосистемные наблюдения необходимы не только для получения локальных коэффициентов, но и для построения функций их зависимости от температуры, влажности, возраста древостоев, режима нарушений и других факторов [16]. Тем самым Tier 3 отличается от простого набора «собственных таблиц»: коэффициент становится параметром модели, изменяющимся в пространстве и времени и сопровождаемым доверительным интервалом.

Многогазовая постановка также предотвращает завышенную оценку климатической эффективности отдельных экосистем. Например, болотный комплекс может аккумулировать углерод в торфе и одновременно быть источником CH_4; лесная территория может сохранять устойчивый CO_2-сток, но испытывать эпизодические выбросы при пожарах. Поэтому для научной интерпретации целесообразно хранить физические потоки каждого газа раздельно и выполнять сведение в CO_2-эквивалент только на этапе агрегированной оценки.

3. Научный суверенитет: верификация, моделирование и пространственная архитектура

Научный суверенитет целесообразно определять как воспроизводимость полного расчётного контура. Он включает: национальные наблюдения; страновые коэффициенты и модели; вычислительную инфраструктуру; независимую верификацию bottom-up и top-down методами; регулярное институциональное обновление. Именно такая логика заложена во втором этапе Единой национальной системы мониторинга на 2026–2030 гг. [9].

Независимая верификация принципиальнее самого происхождения коэффициента. Страновой параметр не становится точным автоматически; его качество определяется измерительной базой и согласованием с атмосферными инверсиями, дистанционным зондированием, статистикой биомассы и потоковыми измерениями. Карбоновые полигоны создают одну из необходимых экспериментальных опор для такого сопоставления [16]. Для антропогенного блока аналогичную роль играют национальные секторные оценки и прозрачная статистика активности [15].

© Solovyev D.A., 2026

Модельный уровень обеспечивают российские модели Земной системы INMCM6 и INM-CM6M, позволяющие независимо исследовать современный и будущий климат [17; 18]. Их связь с кадастром необходима потому, что природные потоки зависят от температуры, осадков, радиации, влажности почвы, пожаров и мерзлотных процессов. Океан, определяющий значительную часть климатической инерционности и многодесятилетнего теплообмена, также должен учитываться в едином контуре [12; 13].

Предлагаемая архитектура представлена на рис. 1. Кадастр в ней является не конечной таблицей, а узлом циклической системы: расхождения с независимыми наблюдениями должны приводить к уточнению коэффициентов и пространственных моделей.



Рис. 1. *Концептуальная схема национальной системы моделирования углеродного баланса России*

Критериями зрелости системы являются воспроизводимость расчёта, метаданные происхождения коэффициентов, количественные неопределённости, пространственная агрегация и дезагрегация, независимая top-down проверка, регулярное обновление и совместимость с форматами МГЭИК/РКИК ООН. Это

© Соловьев Д.А., 2026

позволяет одновременно укреплять национальную методическую самостоятельность и сохранять международную сопоставимость [7; 9].

Практически такой суверенитет состоит из пяти взаимосвязанных уровней. Наблюдательный уровень обеспечивает собственные первичные ряды; методический — национальные EF (emission factors) и модели; вычислительный — инфраструктуру обработки и моделирования; верификационный — независимое сопоставление методов; институциональный — регулярное включение обновлённых параметров в кадастр. Выпадение любого звена снижает воспроизводимость: собственный коэффициент без независимого измерения столь же уязвим, как и внешняя модель без национальной проверки.

Для пространственного баланса принципиальна прослеживаемость происхождения данных. Каждое значение коэффициента или потока должно сопровождаться метаданными: типом экосистемы или технологии, периодом наблюдений, методом измерения, масштабом репрезентативности и стандартной неопределённостью. Такие метаданные позволяют корректно агрегировать результаты и предотвращают двойной счёт, когда один поток одновременно учитывается в лесном секторе, климатическом проекте и региональной компенсационной схеме.

Национальные модели Земной системы позволяют связать кадастровую оценку с климатической динамикой. INM-CM6 и INM-CM6M дают независимый российский инструмент для сценарных расчётов [17; 18], однако для углеродного цикла особенно важна обратная связь: наблюдения уточняют параметры моделей, а модель выявляет регионы и процессы, где неопределённость максимальна и требуется дополнительный мониторинг. Такой цикл переводит систему от периодической инвентаризации к адаптивному моделированию.

Отдельная задача — пространственное описание неопределённости. Карта среднего потока без карты ошибки может создавать ложную однородность качества данных: в хорошо наблюдаемых районах результат в основном эмпирический, а в труднодоступной Арктике, Сибири и на Дальнем Востоке он в большей степени зависит от модели. Совместное хранение потока и неопределённости позволяет корректно взвешивать регионы при национальной агрегации и определять приоритеты дальнейшего расширения сети.

Международная интероперабельность остаётся частью научного суверенитета, а не его ограничением. Российские оценки должны быть сопоставимы с глобальными бюджетами и методами оценки состояния климатической системы [2; 3; 14]. Только при единых границах системы, единицах, временных интервалах и прозрачной документации национальные данные могут использоваться для проверки глобальных моделей и одновременно аргументированно выявлять их региональные смещения.

© Solovyev D.A., 2026

4. Обсуждение: научные и экономические следствия

Переход к Tier 2–Tier 3 меняет статус национального углеродного баланса: вместо применения международной параметризации к российской статистике формируется результат собственной наблюдательной и модельной инфраструктуры. Однако национализация не должна превращаться в выбор «выгодного» коэффициента. Значительное изменение Enet допустимо только при воспроизводимой методике, независимой верификации и явной оценке неопределённости.

Высокоразрешающие карты российских потоков имеют значение и за пределами кадастра. Россия занимает большую часть Северной Евразии, поэтому уточнение потоков бореальных лесов, болот, почв и мерзлотных территорий улучшает проверку глобальных инверсий и моделей углеродного цикла [11; 14]. При этом запас углерода следует отличать от потока: большой запас в почвах или торфе не гарантирует текущего поглощения и при нарушениях может стать источником.

Климатическая нестационарность ограничивает долговечность любых коэффициентов. Современное потепление, изменение экстремальных явлений и возможные нелинейные переходы в климатической системе способны менять поглотительную способность экосистем [1; 2; 3; 4; 19; 20]. Исследования океанических tipping points показывают, что климатические риски целесообразно оценивать с учётом низковероятных, но высокоущербных сценариев [19; 20; 21]. Поэтому Tier 3 следует понимать как адаптивную систему, регулярно переоценивающую параметры по новым наблюдениям.

Методический суверенитет имеет прямое экономическое значение. Национальный баланс используется при низкоуглеродном сценарном анализе, оценке углеродоёмкости отраслей и разработке мер климатической политики [22; 23; 24]. Более точный учёт природного стока не отменяет необходимости сокращать технологические выбросы: Eanth и S относятся к разным механизмам, а поглотительная способность экосистем конечна и подвержена климатическим рискам. Этот принцип согласуется с задачей сохранения конкурентоспособности России в меняющейся международной климатической повестке [25].

Количественный результат пересчёта требует последующей факторной декомпозиции именно потому, что итоговая разность $E_{net}^{new} - E_{net}^{old}$ получена после одновременного уточнения нескольких групп параметров и сама по себе не показывает, какая из них сформировала наблюдаемый эффект. В настоящей работе предлагается оценивать ΔEE_F, ΔE_N и ΔS последовательной заменой групп параметров: сначала рассчитывается базовый баланс со «старыми» значениями, затем одна группа заменяется «новой» при неизменных остальных и фиксируется вызванное этим изменение E_{net}; процедура повторяется для следующих групп. Если параметры независимы, такая схема непосредственно даёт аддитивные вклады, согласующиеся с формулой $\Delta E_{net} = \Delta E_{EF} + \Delta E_N - \Delta S$.

© Соловьев Д.А., 2026

При взаимозависимости факторов результат отнесения вклада может зависеть от порядка замены — например, одни и те же климатические условия одновременно влияют на природные эмиссии и поглощение. В этом случае более корректны методы распределения вклада по всем допустимым порядкам замены (например, декомпозиция по принципу Шепли), которые усредняют эффект взаимодействий и обеспечивают согласование суммы частных вкладов с общим ΔE_{net}. Такой анализ позволил бы количественно отделить влияние антропогенных коэффициентов от уточнения природных эмиссий и экосистемного стока. Пока исходные данные для подобной декомпозиции не опубликованы, 44,8 % следует использовать только как характеристику суммарного методического эффекта пересчёта [7; 8].

На глобальном уровне российские данные потенциально значимы из-за масштаба Северной Евразии, однако перенос национального результата в мировой бюджет требует осторожности. Различные исследования могут использовать разные границы экосистем, наборы газов и способы учёта пожаров, внутренних вод и продукции древесины. Поэтому согласование с Global Carbon Budget и атмосферными инверсиями должно выполняться не по одному итоговому числу, а по сопоставимым компонентам и интервалам неопределённости [11; 14].

Экономический смысл более точного баланса состоит прежде всего в разделении механизмов. Снижение технологических E_{anth} связано с модернизацией производства и энергетики, тогда как сохранение S зависит от устойчивости лесов, болот и почв. Эти направления дополняют, но не заменяют друг друга. Низкоуглеродные сценарии развития России и оценки климатических последствий для экономики требуют раздельного учёта обоих механизмов [22; 23; 24].

Нестационарность климата означает, что коэффициенты, полученные по данным прошлых десятилетий, не должны использоваться бессрочно. Изменение температуры, режима осадков, пожаров, мерзлоты и океанического влияния может постепенно изменять региональные потоки [1; 2; 3; 12]. Дополнительная неопределённость связана с возможными пороговыми переходами в климатической системе [19; 20; 21]. Поэтому регулярное обновление параметров является не техническим обслуживанием, а обязательной частью научной методологии Tier 3.

Заключение

Переход от дефолтных коэффициентов МГЭИК к национальным эмпирически обоснованным параметрам представляет собой закономерное развитие от Tier 1 к Tier 2–Tier 3. Его научный смысл состоит не в отказе от международных правил, а в повышении измеримости, пространственной детализации и воспроизводимости российского углеродного баланса.

© Solovyev D.A., 2026

Показано, что итоговый национальный баланс определяется совместно антропогенными выбросами, природными источниками и поглощением. Поэтому изменение оценки более чем на треть после уточнения 22 коэффициентов следует трактовать как системный эффект новой параметризации.

Комплексные карты CO_2, CH_4 и N_2O, наблюдательные сети и национальные модели создают основу для независимой проверки российского баланса и его включения в исследования углеродного цикла Северной Евразии. Научнометодический суверенитет достигается тогда, когда итоговый баланс может быть независимо воспроизведён, проверен несколькими методами, регулярно обновлён и международно сопоставим.

Литература

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. — Санкт-Петербург : Наукоёмкие технологии, 2022. — 676 с. — ISBN 978-5-907618-13-8.
2. Gulev S. K., Thorne P. W., Ahn J. et al. Changing State of the Climate System // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.). — Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2021. — P. 287–422. — DOI: 10.1017/9781009157896.004.
3. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2025. — Geneva : WMO, 2026. — WMO-No. 1342. — ISBN 978-92-63-11299-7. — DOI: 10.59327/WMO/S/CRI/SOC1.
4. Гулев С. К., Катцов В. М., Соломина О. Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник Российской академии наук. — 2008. — Т. 78, № 1. — С. 20–27.
5. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (eds.). — Hayama : Institute for Global Environmental Strategies, 2006. — 5 vols.
6. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc et al. (eds.). — Geneva : IPCC, 2019. — 5 vols.
7. Гулев С. К., Грицун А. С., Катцов В. М., Лукина Н. В., Порфирьев Б. Н., Романовская А. А., Широв А. А. Мониторинг и прогнозирование изменений климата в целях устойчивого развития России — ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» // Вестник Российской академии наук. — 2026. — Т. 96, № 4. — С. 369–384. — DOI: 10.7868/S3034520026040081.
8. Гулев С. К. Мониторинг и прогнозирование изменений климата в целях устойчивого развития России : доклад на Общем собрании членов РАН, 9 декабря 2025 г. [Видеозапись] [Электронный ресурс]. — Начало доклада: 06:44:30. — URL: https://m.vkvideo.ru/video-224466114_456239110?list=055b99156a8dc16ea5 (дата обращения: 25.08.2026).

© Соловьев Д.А., 2026

9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14 января 2026 г. № 9-р «Об утверждении плана мероприятий (“дорожной карты”) по реализации второго этапа (2026–2030 годы) важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ”» [Электронный ресурс]. — URL: https://government.ru/docs/all/163143/ (дата обращения: 26.08.2026).
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 3240-р «Об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” и плана мероприятий (“дорожной карты”) по реализации первого этапа (2022–2024 годы)».
11. Shvidenko A., Ciais P., Patra P. K. et al. A System Reanalysis of the Current Greenhouse Gases Budget of Terrestrial Ecosystems in Russia // Global Biogeochemical Cycles. — 2025. — Vol. 39, no. 10. — Art. e2025GB008540. — DOI: 10.1029/2025GB008540.
12. Гулев С. К. Глобальные изменения климата и Мировой океан // Проблемы прогнозирования. — 2023. — № 6 (201). — С. 25–36. — DOI: 10.47711/0868-6351-201-25-36.
13. 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. — Vol. 499, no. 7459. — P. 464–467. — DOI: 10.1038/nature12268.
14. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M. W. et al. Global Carbon Budget 2025 // Earth System Science Data. — 2026. — Vol. 18, no. 5. — P. 3211–3288. — DOI: 10.5194/essd-183211-2026.
15. Романовская А. А., Гинзбург В. А., Гладильщикова А. А. и др. Антропогенные потоки парниковых газов в России // Метеорология и гидрология. — 2025. — № 9. — С. 58–83. — DOI: 10.52002/0130-2906-2025-9-58-83.
16. Гулев С. К., Дурманов Н. Д., Ольчев А. В., Шашкин А. П. Пилотный проект карбоновых полигонов на территории России // Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С. К. Гулева, А. В. Ольчева. — Москва : Научный мир, 2025. — С. 9–13.
17. Volodin E. M., Blagodatskikh D. V., Bragina V. V. et al. Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. — 2024. — Vol. 39, no. 6. — P. 379–392. — DOI: 10.1515/rnam-2024-0032.
18. Gritsun A. S., Volodin E. M., Bragina V. V., Tarasevich M. A. Simulation of modern and future climate by INM-CM6M // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. — 2024. — Vol. 39, no. 6. — P. 329–341. — DOI: 10.1515/rnam-2024-0028.
19. 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. — Vol. 575, no. 7784. — P. 592–595. — DOI: 10.1038/d41586-019-03595-0.
20. Wunderling N., von der Heydt A. S., Aksenov Y. et al. Climate tipping point interactions and cascades: a review // Earth System Dynamics. — 2024. — Vol. 15, no. 1. — P. 41–74. — DOI: 10.5194/esd-15-41-2024.

© Solovyev D.A., 2026

21. Гулев С. К., Соловьев Д. А. Энергетика и климатические пороговые состояния (tipping points) океанской системы: риски и неопределённости для XXI века // Окружающая среда и энерговедение. — 2025. — № 4 (28). — С. 39–66. — DOI: 10.24412/2658-6703-20254-39-66. — EDN HJIVUK.
22. Широв А. А. Создание системы мониторинга и прогнозирования выбросов климатически активных веществ в интересах модернизации и развития экономики России // Проблемы прогнозирования. — 2023. — № 6 (201). — С. 11–24. — DOI: 10.47711/08686351-201-11-24.
23. Широв А. А., Колпаков А. Ю. Целевой сценарий социально-экономического развития России с низким уровнем нетто-выбросов парниковых газов до 2060 года // Проблемы прогнозирования. — 2023. — № 6 (201). — С. 53–66. — DOI: 10.47711/08686351-201-53-66.
24. Порфирьев Б. Н., Колпаков А. Ю., Лазеева Е. А. Оценка влияния изменения климата на экономику России с использованием моделей комплексной оценки (IAM) // Проблемы прогнозирования. — 2025. — № 1 (208). — С. 49–61. — DOI: 10.47711/08686351-208-49-61.
25. Гулев С. К., Соловьев Д. А. Глобальные климатические изменения и роль России: новые вызовы и решения COP28 // Окружающая среда и энерговедение. — 2024. — № 3 (23). — С. 4–12. — DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-4-12. — EDN BTKZAF.

References

1. Kattsov V. M., ed. *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation]. Roshydromet. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. 676 p. ISBN 978-5-907618-13-8. (In Russ.).
2. Gulev S. K., Thorne P. W., Ahn J., et al. Changing State of the Climate System. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al., eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press; 2021. P. 287– 422. DOI: 10.1017/9781009157896.004.
3. World Meteorological Organization. *State of the Global Climate 2025*. Geneva: WMO; 2026. WMO-No. 1342. ISBN 978-92-63-11299-7. DOI: 10.59327/WMO/S/CRI/SOC1.
4. Gulev S. K., Kattsov V. M., Solomina O. N. Global warming continues. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences]. 2008;78(1):20–27. (In Russ.).
5. IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., eds. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies; 2006. 5 vols.
6. IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., et al., eds. Geneva: IPCC; 2019. 5 vols.
7. Gulev S. K., Gritsun A. S., Kattsov V. M., Lukina N. V., Porfiriev B. N., Romanovskaya A. A., Shirov A. A. Monitoring and forecasting climate change for the goals of sustainable development of Russia — a critical innovative project of national significance “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances”. *Vestnik Rossiiskoi akademii*

© Соловьев Д.А., 2026

nauk [Herald of the Russian Academy of Sciences]. 2026;96(4):369–384. DOI: 10.7868/S3034520026040081. (In Russ.).
8. Gulev S. K. Monitoring and forecasting climate change for the goals of sustainable development of Russia: report at the General Meeting of Members of the Russian Academy of Sciences, December 9, 2025 [Video]. Available at: https://m.vkvideo.ru/video224466114_456239110?list=055b99156a8dc16ea5 (accessed August 25, 2026). (In Russ.).
9. Government of the Russian Federation. Order No. 9-r of January 14, 2026, approving the roadmap for implementation of the second stage (2026–2030) of the Critical Innovative Project of National Significance "Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances". Available at: https://government.ru/docs/all/163143/ (accessed August 26, 2026). (In Russ.).
10. Government of the Russian Federation. Order No. 3240-r of October 29, 2022, approving the Critical Innovative Project of National Significance "Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances" and the roadmap for its first stage (2022–2024). (In Russ.).
11. Shvidenko A., Ciais P., Patra P. K., et al. A System Reanalysis of the Current Greenhouse Gases Budget of Terrestrial Ecosystems in Russia. *Global Biogeochemical Cycles*. 2025;39(10):e2025GB008540. DOI: 10.1029/2025GB008540.
12. Gulev S. K. Global climate change and the World Ocean. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development]. 2023;(6(201)):25–36. DOI: 10.47711/0868-6351201-25-36. (In Russ.).
13. 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; 499 (7459): 464–467. DOI: 10.1038/nature12268.
14. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., et al. Global Carbon Budget 2025. *Earth System Science Data*. 2026;18(5):3211–3288. DOI: 10.5194/essd-18-3211-2026.
15. Romanovskaya A. A., Ginzburg V. A., Gladilshchikova A. A., et al. Anthropogenic greenhouse gas fluxes in Russia. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2025;(9):58–83. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-9-58-83. (In Russ.).
16. Gulev S. K., Durmanov N. D., Olchev A. V., Shashkin A. P. Pilot project of carbon polygons in the Russian Federation. In: Gulev S. K., Olchev A. V., eds. *Karbonovye poligony: monitoring, geoinformatsionnye sistemy, sekvestratsionnye tekhnologii* [Carbon Polygons: Monitoring, Geoinformation Systems, and Sequestration Technologies]. Moscow: Nauchnyi mir; 2025. P. 9–13. (In Russ.).
17. Volodin E. M., Blagodatskikh D. V., Bragina V. V., et al. Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2024;39(6):379–392. DOI: 10.1515/rnam-2024-0032.
18. Gritsun A. S., Volodin E. M., Bragina V. V., Tarasevich M. A. Simulation of modern and future climate by INM-CM6M. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2024;39(6):329–341. DOI: 10.1515/rnam-2024-0028.

© Solovyev D.A., 2026

19. 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;575(7784):592–595. DOI: 10.1038/d41586-019-03595-0.
20. Wunderling N., von der Heydt A. S., Aksenov Y., et al. Climate tipping point interactions and cascades: a review. *Earth System Dynamics*. 2024;15(1):41–74. DOI: 10.5194/esd-15-41-2024.
21. Gulev S. K., Solovyev D. A. Energy and climate tipping points of the ocean system: risks and uncertainties for the 21st century. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*. 2025; (4(28)): 39–66. DOI: 10.24412/2658-6703-2025-4-39-66. EDN HJIVUK.
22. Shirov A. A. Development of a system for monitoring and forecasting emissions of climate-active substances in the interests of modernization and development of the Russian economy. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development]. 2023; (6(201)): 11–24. DOI: 10.47711/0868-6351-201-11-24. (In Russ.).
23. Shirov A. A., Kolpakov A. Yu. Target scenario of Russia's socio-economic development with a low level of net greenhouse gas emissions until 2060. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development]. 2023; (6(201)): 53–66. DOI: 10.47711/0868-6351-201-53-66. (In Russ.).
24. Porfiriev B. N., Kolpakov A. Yu., Lazeeva E. A. Assessment of the impact of climate change on the Russian economy using integrated assessment models (IAM). *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development]. 2025; (1(208)): 49–61. DOI: 10.47711/0868-6351-208-49-61. (In Russ.).
25. Gulev S. K., Solovyev D. A. Global climate change and Russia's role: new challenges and COP28 solutions. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*. 2024; (3(23)): 4–12. DOI: 10.24412/2658-6703-2024-3-4-12. EDN BTKZAF.

© Соловьев Д.А., 2026

УДК 620.9: 661.96
DOI: 10.7868/S2658670326030108

Развитие углеродного рынка в Китае

Берёзкин Михаил Юрьевич
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-6945-2131; e-mail: mberezkin@inbox.ru

Дегтярев Кирилл Станиславович
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-1738-6320; e-mail: kir1111@rambler.ru

Синюгин Олег Анатольевич
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-5874-4342; e-mail: sinyugin.oleg@yandex.ru

Аннотация. Китайский рынок углерода прошел путь от ряда пилотных проектов регионального уровня по торговле квотами на выбросы до крупнейшего в мире обязательного рынка углерода (по объему охватываемых выбросов). Эта трансформация была тесно связана с архитектурой политики, выстроенной Китаем вокруг его «определяемых на национальном уровне вкладов» (ОНУВ) 2015 г. в рамках Парижского соглашения, объявленных в 2020 г. целей по достижению пика выбросов углерода к 2030 г. и углеродной нейтральности к 2060 г., а также обновленных национально определяемых вкладов на 2030 и 2035 гг. Национальная система торговли квотами на выбросы начала торги в режиме онлайн в июле 2021 г., первоначально охватив электроэнергетический сектор. В рамках первого цикла выполнения обязательств система охватывала 2162 крупных предприятия-эмитента и объем выбросов около 4,5 млрд т CO_2 в год. В последующих циклах для электроэнергетики этот показатель вырос примерно до 5,1–5,2 млрд т. В 2025 г. в систему были включены отрасли производства стали, цемента и выплавки алюминия, в результате чего число крупных предприятий-эмитентов, подпадающих под регулирование квот, достигло 3378, а отраслевой охват системы существенно расширился. В данной статье прослеживается институциональная и рыночная эволюция системы в период с 2015 по 2025 гг., описываются ее география и отраслевая структура, определяются основные участники и рыночная инфраструктура, а также анализируются объемы квот, цены, торговый оборот, динамика выполнения обязательств и меняющаяся роль углеродных издержек.

Ключевые слова: углеродный рынок, Парижское соглашение, определяемые на национальном уровне вклады, система торговли квотами на выбросы.

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы ГЗ НИЛ ВИЭ МГУ «Ресурсы, география и эколого-экономическая эффективность возобновляемой энергетики в условиях энергетического перехода» (126040819887-8).

Для цитирования: Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Развитие углеродного рынка в Китае // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 157–173. DOI: 10.7868/S2658670326030108

Дата поступления в редакцию: 30.08.2026
Дата принятия к публикации: 30.09.2026

UDC 620.9: 661.96
DOI: 10.7868/S2658670326030108

Development of the carbon market in China

Mikhail Berezkin
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-6945-2131; e-mail: mberezkin@inbox.ru

Kirill S. Degtyarev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-1738-6320; e-mail: kir1111@rambler.ru

Oleg Sinyugin
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-5874-4342; e-mail: sinyugin.oleg@yandex.ru

Abstract. The Chinese carbon market has evolved from a series of regional cap-and-trade pilot projects to become the world's largest mandatory carbon market (by volume of emissions covered). This transformation was closely linked to the policy architecture built by China around its “intended nationally determined contributions” of the 2015 Paris Agreement, its 2020 targets for peak carbon emissions by 2030 and carbon neutrality by 2060, and updated nationally determined contributions for 2030 and 2035. The national Emissions Trading System (ETS) began online trading in July 2021, initially covering the electricity sector. In the first commitment cycle, the system covered 2,162 large emitters and emitted approximately 4.5 billion tons of CO_2 per year. In subsequent cycles for the electricity sector, this figure increased to approximately 5.1–5.2 billion tons. In 2025, the steel, cement and aluminum smelting industries were included in the system, as a result of which the number of large emitters subject to quota regulation reached 3,378, and the sectoral coverage of the system expanded significantly. This article traces the institutional and market evolution of the system from 2015 to 2025, describes its geography and sectoral structure, identifies key

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

participants and market infrastructure, and analyzes quotas, prices, trade turnover, compliance dynamics and the changing role of carbon costs.

Keywords: carbon market, Paris Agreement, nationally determined contributions, emissions trading system.

Acknowledgments. This work was completed within the framework of the Moscow State University Research Laboratory of Renewable Energy's (RES) research project "Resources, Geography, and Ecological and Economic Efficiency of Renewable Energy in the Context of Energy Transition" (126040819887-8)

For citation: Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., Sinyugin O.A. (2026). Development of the carbon market in China. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*. 157–173. DOI: 10.7868/S2658670326030108 (in Russ.).

Received: 30.08.2026
Accepted: 30.09.2026

Введение

Китайский рынок углерода следует рассматривать не как единую биржевую площадку, а как комплексную систему мер государственной политики. Она включает в себя обязательную национальную систему торговли выбросами (ETS), национальный механизм добровольного выпуска углеродных единиц, а также действующие региональные пилотные системы торговли квотами, которые продолжают функционировать для источников выбросов, не охваченных национальной системой. Региональные пилотные проекты — в Пекине, Шанхае, Тяньцзине, Чунцине, Шэньчжэне, провинциях Гуандун и Хубэй — послужили своего рода лабораториями для отработки механизмов распределения квот, систем мониторинга, отчетности и верификации (MRV), обеспечения соблюдения требований и организации торговли. Полученный в ходе их реализации опыт лег в основу национальной системы. Решающий переход к общенациональному уровню произошел после представления Китаем в 2015 году определяемых на национальном уровне вкладов (ОНУВ - NDC) и подписания Парижского соглашения: ценообразование на углерод стало одним из инструментов более широкой стратегии, направленной на повышение энергоэффективности, ограничение потребления угля, расширение использования возобновляемых источников энергии и реструктуризацию промышленности.

Особенность национальной системы ETS заключается в том, что ее первоначальная архитектура базировалась на показателе углеродоемкости. Вместо установления фиксированного общеэкономического лимита на общий объем выбросов квоты для предприятий электроэнергетики распределялись преимущественно на безвозмездной основе с учетом объемов выработки и

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

целевых показателей удельных выбросов. Эффективные электростанции могли формировать относительный излишек квот, тогда как менее эффективные сталкивались с их дефицитом и были вынуждены либо докупать квоты, либо снижать углеродоемкость производства.

Подход Китая к выполнению обязательств по Парижскому соглашению формировался параллельно с развитием международных процессов. В представленных в 2015 году «определяемых на национальном уровне вкладах» (ОНУВ) Китай взял на себя обязательства обеспечить пиковый уровень выбросов CO_2 примерно к 2030 году (приложив максимальные усилия для достижения этого пика раньше), снизить углеродоемкость ВВП на 60–65% по сравнению с уровнем 2005 года, довести долю неископаемых источников в структуре первичного энергопотребления примерно до 20% и увеличить объем лесных ресурсов. В обновленных ОНУВ, представленных в 2021 году, целевой показатель снижения углеродоемкости был ужесточен (превысив 65%), доля неископаемых источников увеличена примерно до 25%, а также предусмотрено наращивание мощностей ветровой и солнечной энергетики более чем на 1,2 ТВт; кроме того, в документе были отражены заявленные цели по достижению пика выбросов CO_2 до 2030 года и углеродной нейтральности до 2060 года. В ноябре 2025 года Китай представил ОНУВ с горизонтом планирования до 2035 года. Таким образом, систему ETS следует рассматривать скорее как механизм реализации, встроенный в более широкий комплекс национальной климатической и промышленной политики, а не как единственный инструмент достижения целей Парижского соглашения.

В период после 2025 года ключевым вопросом политики станет трансформация ETS из системы сбора данных о выбросах и управления углеродоемкостью в более мощный механизм ценообразования на углерод, основанный на принципе ограниченности квот. Официальный курс предполагает расширение отраслевого охвата, укрепление правовой базы, совершенствование системы MRV, оптимизацию процедур распределения квот и контроля за соблюдением обязательств, развитие добровольного рынка, а также рассмотрение возможностей международного сотрудничества на углеродных рынках.

1. Парижское соглашение и 2015 год как отправная точка

2015 год служит подходящей отправной точкой, поскольку он связывает воедино два процесса, которые до этого развивались отчасти независимо друг от друга: внутренние эксперименты Китая по внедрению торговли квотами на выбросы и формирование международной климатической архитектуры, кульминацией которого стало принятие Парижского соглашения. Китай запустил региональные пилотные проекты по углеродному рынку еще до Парижского соглашения, но Национально определяемый вклад в сокращение

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

выбросов (INDC) 2015 года дал более четкую национальную траекторию смягчения последствий изменения климата и позволил рассматривать торговлю выбросами как часть долгосрочного национального вклада в глобальную стабилизацию климата. INDC был представлен в UNFCCC ООН 30 июня 2015 года [1]. В нем Китай обязался достичь пика выбросов углекислого газа примерно к 2030 году и приложить все усилия для достижения пика раньше. В нем также были установлены целевые показатели по углеродоемкости, неископаемым источникам энергии и лесным углеродным поглотителям. Эти показатели не были выражены в виде абсолютного общеэкономического углеродного бюджета, что важно для понимания последующей структуры системы торговли выбросами.

Само Парижское соглашение не требует от страны функционирования системы торговли выбросами. Вместо этого оно требует от сторон подготовки, распространения и поддержания последовательных национально определяемых вкладов (ОНУВ) и проведения внутренних мер по смягчению последствий, направленных на их достижение. Такая структура предоставляет правительствам значительную свободу действий в отношении политических инструментов. Для Китая торговля квотами на выбросы стала одним из компонентов более широкого комплекса мер, который также включает в себя внедрение возобновляемых источников энергии, стандарты энергоэффективности, модернизацию промышленности, контроль потребления угля, электрификацию, «зеленое» финансирование и административные целевые показатели [2, 3].

Первоначальные китайские пилотные проекты сыграли важную роль в этом институциональном обучении. Шэньчжэнь начал торговлю в 2013 году, за ним последовали Шанхай, Пекин, Гуандун и Тяньцзинь в тот же период; Хубэй и Чунцин начали в 2014 году. Позже Фуцзянь также разработал пилотный рынок. Эти системы различались по охвату секторов, пороговым значениям, правилам распределения и ценам. Такое разнообразие было преднамеренным: национальные власти могли наблюдать за тем, как различные региональные экономики обрабатывают данные об учете выбросов и соблюдении требований. Пекин и Шанхай представляли собой мегаполисы с развитой сферой услуг; Гуандун и Шэньчжэнь — ориентированные на экспорт производственные регионы; Хубэй — крупные внутренние промышленные экономики; Тяньцзинь и Чунцин вносили дополнительные различия в промышленную структуру и управление.

Таким образом, связь между Парижским соглашением и китайской системой торговли выбросами является косвенной, но стратегически важной. Парижское соглашение обеспечило повторяющийся цикл амбиций и международный контекст отчетности. Внутренние цели Китая по «двойному углеродному» сокращению — достижение пика выбросов CO_2 до 2030 года и углеродная нейтральность к 2060 году (табл. 1).

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

Таблица 1. *Хронология: от пилотных проектов к национальному рынку*

Годы	События
2015–2016	Консолидация пилотных проектов и вступление в силу Парижского соглашения. Пилотные проекты позволили накопить опыт в распределение квот и проведение аукционов
2017	Политический старт создания национальной системы торговли квотами на выбросы (СТВ); сектор электоэнергетики выбран первым
2018–2020	Институциональные преобразования и техническая подготовка; в сентябре 2020 года Китай объявил о целях по достижению пика выбросов CO_2 до 2030 года и углеродной нейтральности до 2060 года
2021	Начало национальных торгов в режиме онлайн; в феврале 2021 года вступили в силу «Временные правила управления торговлей квотами на выбросы углерода».
2022–2023	Второй цикл выполнения обязательств и развитие рынка. Уровень цен вырос, а компании приобрели опыт управления углеродными активами
2024	Укрепление правовой базы, возобновление добровольного рынка и рост цен. В апреле 2024 года цена национальной углеродной квоты впервые превысила 100 юаней за тонну.
2025	Расширение системы на тяжелую промышленность. В марте 2025 года МЕЕ утвердило план мероприятий по включению в национальную систему торговли квотами предприятий черной металлургии, а также производств цемента и алюминия.
2026	Расширение рынка. Новая фаза ценообразования на выбросы
2027	Дальнейшее расширение системы на все промышленные сектора
2030	Достижение пика выбросов. Переход к снижению выбросов
2060	Углеродная нейтральность

Источник: [1]

2. География: национальный охват и сохраняющаяся роль региональных пилотных проектов в Китае

Национальная система торговли выбросами имеет географически всеобъемлющий характер: регулируемые субъекты расположены по всей территории провинций, автономных регионов и центрально управляемых муниципалитетов Китая. Этот национальный масштаб имеет важное экономическое значение, поскольку цепочки поставок электроэнергии и промышленных товаров пересекают границы провинций. Единая система выдачи квот и общие правила соблюдения требований уменьшают фрагментацию, характерную для пилотного периода. Тем не менее реализация остается многоуровневой. Министерство экологии и окружающей среды устанавливает национальные правила и технические требования, в то время как провинциальные экологические и природоохранные органы выполняют важные

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

функции в управлении субъектами, отчетности о выбросах, организации проверок, распределении квот и надзоре за соблюдением требований.

Пилотные системы не утратили своей актуальности с открытием национального рынка. Вместо этого установки энергетического сектора, охватываемые национальной системой торговли выбросами, как правило, были исключены из дублирующих обязательств пилотных проектов, в то время как пилотные проекты продолжали регулировать другие местные сектора и субъекты. Это создает многоуровневую географию. Группа компаний может столкнуться с национальной системой торговли выбросами в отношении дочерней компании, занимающейся производством электроэнергии, в то время как другая дочерняя компания остается под действием муниципального или провинциального пилотного проекта.

Гуандун иллюстрирует масштаб крупного пилотного проекта. ICAP сообщает об ограничении выбросов на 2024 год в размере около 94 млн т CO_2 для пилотного проекта в Гуандуне, охватывающего промышленность, здания и внутреннюю авиацию после миграции в национальный энергетический сектор. Пилотный проект в Шанхае охватывает промышленность, здания, внутреннюю авиацию и морскую деятельность, в то время как Шэньчжэнь включил промышленность, здания, транспорт и отходы. В Хубэе исторически применялся широкий промышленный порог, а не узкий список секторов. Эти рынки остаются полезными лабораториями для секторов, которые впоследствии могут перейти в национальную систему торговли выбросами [3, 4].

Географический аспект также имеет значение, поскольку предельные издержки декарбонизации существенно различаются по всему Китаю. Северные и западные провинции, зависящие от угля, прибрежные производственные центры, богатые гидроэнергетикой юго-западные регионы и провинции с высокой долей возобновляемой энергии сталкиваются с различными технологическими и энергетическими ограничениями. Национальная цена на углерод может, в принципе, направлять сокращение выбросов в сторону более дешевых возможностей. Однако эффективность такого пространственного выравнивания зависит от реформы рынка электроэнергии и системы передачи. Если производители электроэнергии не могут в полной мере реагировать на цены на углерод, поскольку диспетчеризация или тарифы ограничивают выбор оперативных решений, теоретическая выгода от национальной системы торговли квотами на электроэнергию ослабевает. С учетом географического размещения предприятий тяжелой промышленности расширение системы в 2025 году приобретает особое значение. Производство стали и цемента сосредоточено в крупных промышленных провинциях, тогда как выплавка алюминия зачастую привязана к регионам с развитой энергетической инфраструктурой. Объединение этих секторов в рамках единой национальной системы позволяет увязать углеродные издержки в электроэнергетике и производстве материалов.

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

Это может повлиять на географию новых инвестиций: технологии производства низкоуглеродистой стали, замещения клинкера, использования альтернативных видов топлива, а также методы получения алюминия с применением инертных анодов или низкоуглеродистых технологий могут стать более привлекательными в регионах, где есть доступ к возобновляемым источникам энергии, водороду, металлолому, мощностям для улавливания и хранения углерода или эффективной логистике.

Таким образом, географию китайского углеродного рынка следует рассматривать на трех уровнях. Первый — международный: рынок способствует выполнению обязательств Китая в рамках Парижского соглашения и в перспективе может быть интегрирован с механизмами сотрудничества по статье 6 и зарубежными мерами трансграничного углеродного регулирования. Второй — национальный: единая система торговли квотами устанавливает сопоставимые обязательства для охваченных секторов во всех провинциях. Третий — субнациональный: реальные затраты на соблюдение требований по-прежнему зависят от пилотных проектов, возможностей провинций по внедрению системы, а также от структуры местной промышленности и доступных энергоресурсов. Сочетание этих уровней является определяющей чертой китайской модели.

3. Участники, институты и инфраструктура углеродного рынка Китая

Основными участниками процесса соблюдения требований являются «ключевые субъекты-эмитенты», определенные в соответствии с национальными правилами [5].

Министерство экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики (МЕЕ) является центральным регулятором. Оно разрабатывает национальную политику, планы распределения, правила учета и рыночные правила, а также осуществляет надзор за системой. Провинциальные экологические и природоохранные органы реализуют важные элементы на местном уровне. Национальная система регистрации фиксирует владение квотами и их передачу, а национальная торговая платформа предоставляет площадку для операций с квотами. Шанхайская экологическая и энергетическая биржа управляет национальной торговой системой; национальная функция регистрации была связана с инфраструктурой провинции Хубэй/Ухань. Органы по проверке, поставщики технических услуг, биржи, банки и другие финансовые учреждения формируют расширяющуюся экосистему вокруг регулируемых фирм.

На раннем этапе развития национального рынка доступ был намеренно ограничен. Центральными участниками торгов были организации, занимающиеся соблюдением требований, а набор продуктов – ограниченным, особенно по сравнению со зрелыми финансовыми рынками углеродных квот.

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

Это снизило спекулятивную активность и системный риск, но также способствовало низкому обороту по выбросам. Торговля, как правило, концентрировалась вблизи сроков соблюдения требований.

Национальный рынок добровольного сокращения выбросов парниковых газов возобновил свою работу в январе 2024 г. в рамках обновленной системы. К концу 2025 г. МЕЕ установила 33 зарегистрированных проектов с подтвержденным сокращением выбросов на 17,7637 млн т, совокупным объемом торговли сертифицированными сокращениями на 9,2194 млн т, оборотом в 650 млн юаней и 6106 зарегистрированными счетами среди владельцев проектов, ключевых эмитентов, финансовых учреждений и других юридических лиц.

Взаимосвязь между квотами и кредитами имеет важное значение. Квота представляет собой разрешение на выбросы в рамках обязательной системы, в то время как кредит – это сертифицированное сокращение или удаление, полученное в соответствии с утвержденной методологией.

Институциональная архитектура также выполняет функцию управления, выходящую за рамки торговли. Учет выбросов углерода требует от компаний создания внутренних систем данных, распределения ответственности за информацию о выбросах, взаимодействия с проверяющими органами и включения углеродного следа в бюджетирование. Для крупных государственных предприятий показатели выбросов углерода могут стать частью инвестиционного планирования на уровне группы. Для частных компаний это может повлиять на финансирование, требования клиентов и экспортную стратегию. Таким образом, постепенное развитие профессиональной рабочей силы в области управления выбросами углерода является одним из менее заметных, но потенциально долгосрочных результатов системы торговли квотами на выбросы углерода.

4. Объемы, цены, оборот и динамика углеродного рынка Китая

Различие между «охваченными выбросами» и «объемом торговли» имеет фундаментальное значение. Национальная система торговли квотами на выбросы углерода Китая охватывает миллиарды тонн ежегодных выбросов, но лишь небольшая часть квот переходит из рук в руки в течение года. Большинство квот первоначально выделяется бесплатно, и компании сдают их для соблюдения требований. Торговля происходит, когда у предприятий есть излишки, дефициты, потребности в управлении портфелем или ожидания относительно будущих цен. Следовательно, низкий коэффициент оборота не означает, что обязательство по соблюдению требований распространяется только на торгуемые тонны; это означает, что многие охваченные тонны компенсируются квотами, которые остаются у их первоначальных владельцев до момента сдачи

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

Национальная система ETS начала торги в режиме онлайн 16 июля 2021 года начались с отметки 48 юаней за тонну и завершились на уровне 54,22 юаня за тонну. По данным государственных органов, средняя цена квоты в первом периоде составила около 42,85 юаня за тонну [6]. Этот ценовой показатель был скромным по сравнению с системой торговли выбросами ЕС (EU ETS), однако прямое сопоставление рынков может быть обманчивым, поскольку системы различались по жесткости установленных лимитов, механизмам распределения квот, ценам на энергоносители, степени зрелости рынка и участию финансовых институтов. Приоритетной задачей первого цикла в Китае было создание эффективных систем отчетности и контроля соблюдения обязательств, охватывающих огромные объемы выбросов.

В ходе второго цикла соблюдения обязательств выросли как объем, так и стоимость торгов. МЕЕ сообщило, что совокупный объем торгов квотами (CEA) во втором цикле составил 263 млн т, а их стоимость — 17,26 млрд юаней; это означает рост объема на 47,01% и стоимости на 125,26% по сравнению с первым циклом. Данные показатели свидетельствуют о существенном росте цен, несмотря на то, что рынок по-прежнему функционировал преимущественно в рамках выполнения нормативных требований. К концу 2023 года совокупный объем торгов на национальном рынке с момента его запуска достиг 442 млн т. Рынок превратился в инструмент выполнения регулярных корпоративных обязательств, перестав быть разовым политическим экспериментом [7].

Особого внимания заслуживает динамика цен в 2024 г. Ежедневная сводная цена закрытия варьировалась примерно от 69 до 106 юаней за тонну, причем 24 апреля она впервые превысила отметку в 100 юаней. Торги 31 декабря закрылись на уровне 97,49 юаня за тонну, что на 22,75% выше показателя конца 2023 года. Годовой объем торгов достиг 189 млн тонн, однако активность носила ярко выраженный сезонный характер: Шанхайская биржа окружающей среды и энергетики сообщила, что 79% годового объема торгов пришлось на четвертый квартал, а на долю одного лишь декабря пришлось 75,3655 млн т [8]. Такая концентрация сделок свидетельствует о том, что сроки выполнения обязательств оставались главным фактором, определяющим ликвидность рынка.

В марте 2025 года МЕЕ утвердило план мероприятий по включению в национальную систему торговли квотами предприятий черной металлургии, а также производств цемента и алюминия. Расширенная система охватила 3378 крупных предприятий-эмитентов, подпадающих под регулирование квот. К концу года совокупный объем торгов квотами CEA достиг 865 млн т, а общий оборот — 57,663 млрд юаней. Годовой объем торгов в 2025 году составил на 24% больше, чем в 2024 году, а оборот — 14,630 млрд юаней.

Рынок 2025 года характеризовался сочетанием расширения масштабов деятельности и снижения средней цены. Зафиксированная в 2025 г. средняя цена составила 62,36 юаня за тонну, а цена закрытия на конец года — 74,63 юаня за

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

тонну (табл. 2). Это не обязательно свидетельствует о снижении амбициозности долгосрочной политики. В системе, основанной на показателях углеродоемкости, цены могут реагировать на пересмотр базовых нормативов, сроки распределения квот, ожидания относительно выхода новых участников в сектор, практику переноса квот на будущие периоды (банкинг) и баланс между избытком и дефицитом квот. Расширение системы в 2025 году также изменило состав участников рынка и ожидания относительно будущего соотношения спроса и предложения [2, 7].

Ключевым структурным вопросом является взаимосвязь между оборотом и глубиной рынка. Совокупный объем торгов в 865 млн тонн к концу 2025 года велик в абсолютном выражении, но невелик по сравнению с многомиллиардными объемами выбросов, охватываемыми системой ежегодно. Развитые рынки торговли углеродом часто демонстрируют гораздо более высокие финансовые обороты, поскольку квоты и производные финансовые инструменты перепродаются многократно.

Таблица 2. *Динамика углеродного рынка Китая 2021-2025 гг.*

Год/ цикл	**Охват/ предприятия**	**Годовой объем торгов квотами CEA**	**Объем торговли**	**Ценовой индикатор**	**События**
2021/ первый цикл	2,162 предприятий электро-энергетики; ~4.5 млрд т CO_2/год	179 млн т в 2021	7.661 млрд юань	54.22 юань /т CO_2 в конце года	Первое выполнение квот
Конец 2023/ второй цикл	2,257 предприятий электро-энергетики; ~5.1 млрд т CO_2/год	442 млн т	24.92 млрд юань	Цены выше, чем в первом цикле	Объем торговли за второй цикл +47% к первому циклу
2024	2,096 предприятий электро-энергетики ~5.2 млрд т CO_2/год	189 млн т за год; 630 млн т	18.114 млрд юань в год; 43.033 млрд юань	97.49 юань /т CO_2 конец года	79% годового объема
2025	3,378 предприятий электро-энергетики, сталь, цемент, алюминий	235 млн т за год; 865 млн т	14.630 млрд юань в год; 57.663 млрд юань	62.36 юань /т CO_2 в среднем; 74.63 юань /т CO_2 конец года	Объем торговли +24%; секторальное расширение

Источник: [9, 10, 11].

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

5. Обновление определяемых на национальном уровне вкладов в Китае

Представленный Китаем в 2015 году предварительный вариант ОНУВ и последующие обновления этого документа сформировали международные рамки, в которых функционирует ETS. Первоначальный пакет целей на период до 2030 года был ориентирован на достижение пикового уровня выбросов и снижение их интенсивности, а не на установление абсолютной цели по сокращению выбросов относительно фиксированного базового года. Такой подход соответствовал статусу Китая как быстрорастущей экономики и его внутренней политике, уделявшей особое внимание энергоемкости и структурным преобразованиям. Принцип работы национальной ETS, основанный на показателях удельных выбросов (на единицу продукции), отражает эту логику: изначально система была нацелена на регулирование эффективности выбросов на единицу выпускаемой продукции, а не на установление жесткого абсолютного лимита выбросов для электроэнергетического сектора.

В обновленном ОНУВ, представленном в 2021 году, были ужесточены целевые показатели: к 2030 году планируется сократить выбросы CO_2 на единицу ВВП более чем на 65% по сравнению с уровнем 2005 года, увеличить долю неископаемых источников в структуре первичного энергопотребления примерно до 25%, нарастить объем лесных ресурсов на 6 млрд кубометров (относительно уровня 2005 года) и довести суммарную мощность ветровых и солнечных электростанций до уровня свыше 1,2 млрд кВт. В документе также были отражены объявленные на национальном уровне цели по достижению пика выбросов CO_2 до 2030 года и углеродной нейтральности к 2060 году. Эти цели расширили политический контекст функционирования ETS: рынок перестал восприниматься исключительно как инструмент повышения эффективности и стал рассматриваться как элемент инфраструктуры для долгосрочного перехода к нулевому уровню выбросов.

ETS в электроэнергетическом секторе способствует реализации ОНУВ по нескольким направлениям [12]. Она стимулирует повышение эффективности генерации на основе ископаемого топлива, создает систему управления выбросами, повышает относительную стоимость производства электроэнергии с высоким уровнем выбросов и готовит компании к ужесточению ограничений в будущем. Тем не менее, расширение использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и реформа рынка электроэнергии могут оказать более значительное краткосрочное влияние на абсолютный объем выбросов в секторе, чем ценовые сигналы самой ETS. Эти инструменты дополняют друг друга: политика в области ВИЭ меняет структуру генерации, тогда как ETS формирует технологически нейтральную оценку стоимости выбросов для охваченных системой генерирующих мощностей, работающих на ископаемом топливе.

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

6. Итоги, перспективы и тенденции углеродного рынка Китая после 2025 года

Важнейшим достижением за десятилетие с 2015 по 2025 год стало институциональное масштабирование системы. Китай перешел от разрозненных локальных экспериментов к общенациональному рынку квот, охватывающему объемы выбросов, не имеющие аналогов в других системах торговли выбросами. Для этого потребовалось внедрить стандартизированные правила учета, создать национальные реестры, торговую платформу, процедуры верификации и методики распределения квот, а также обеспечить необходимый административный потенциал на уровне провинций. Создание такой инфраструктуры — сложная задача, однако она закладывает фундамент для более амбициозной климатической политики в будущем, даже если на начальном этапе дефицит квот остается умеренным.

Вторым достижением стала нормализация процессов соблюдения углеродных обязательств внутри крупных предприятий. Энергетические компании, ранее рассматривавшие выбросы преимущественно как вопрос экологической отчетности, перешли к управлению торгуемыми квотами, имеющими финансовую стоимость. Включение предприятий тяжелой промышленности в систему в 2025 году распространило этот подход и на производителей материалов. Управление углеродными выбросами становится стандартной корпоративной функцией, в которой задействованы производственные и финансовые подразделения, экологические службы и высшее руководство.

Третьим важным моментом стало формирование общенационального ценового индикатора на углерод. Цена выросла с уровня чуть ниже 50 юаней в период запуска до более чем 100 юаней за тонну в отдельные моменты 2024 года, после чего в 2025 году последовал спад. Динамика цен не была линейной, и ее не следует рассматривать как простой показатель амбициозности политики. Тем не менее, наличие общенациональной цены на квоты дает компаниям и инвесторам единый ориентир для оценки стоимости выбросов. Это существенное отличие от периода разрозненных пилотных проектов.

Китая демонстрирует стратегию последовательного внедрения: пилотные проекты, стандартизация, масштабирование, усиление законодательства, а затем расширение сферы действия. Главный вопрос на следующее десятилетие заключается в том, сможет ли подход постепенного ужесточения ограничений на выбросы достаточно быстро перейти от институционального строительства к постепенно ужесточающимся ограничениям, чтобы обеспечить достижение целей на 2030, 2035 и 2060 годы.

Китайская политика на следующее десятилетие обозначила следующие цели:

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

- ***Продолжение расширения секторов***. Включения всех основных промышленных секторов в национальный углеродный рынок примерно к 2027 году. Точная последовательность может зависеть от качества данных и технической готовности. Расширение на нефтехимическую, химическую, бумажную, дополнительные цветные металлы и авиацию увеличит долю национальных выбросов, облагаемых единой ценой на углерод, и уменьшит роль региональных пилотных проектов для крупных промышленных источников.

- ***Ужесточение распределения квот.*** В системе, основанной на интенсивности выбросов, основным рычагом дефицита является жесткость контрольных показателей. Власти могут снижать контрольные значения, корректировать поправочные коэффициенты, уменьшать постфактумную щедрость или вводить абсолютный потолок.

- ***Циклы соблюдения требований могут стать более регулярными***, а информация — более своевременной. Длительные задержки между годом выбросов, окончательным распределением и сдачей квот могут ослабить сигнал форвардной цены. Более предсказуемые годовые циклы позволили бы компаниям хеджировать риски и планировать инвестиции. Своевременная публикация проверенных данных о выбросах, предложении квот и статистике соблюдения требований также улучшила бы анализ рынка.

- ***Добровольный рынок будет расширяться вместе с системой торговли выбросами.*** Новые методологии могут мобилизовать меры по смягчению последствий изменения климата в таких областях, как контроль выбросов метана, лесное хозяйство и восстановление экосистем, возобновляемые источники энергии или энергоэффективность, управление отходами и другие виды деятельности. Стратегическая задача состоит в поддержании высокого кредитного качества. Как показали глобальные добровольные рынки, слабая дополнительность или нечеткие заявления могут быстро подорвать доверие. Централизованная методология и модель регистрации в Китае предоставляют инструменты для контроля качества, но их реализация определит доверие.

- ***Углеродный след продукции и торговая политика станут более тесно связаны с системой торговли выбросами***. Экспортеры все чаще сталкиваются с запросами на предоставление проверенных данных о выбросах от клиентов, финансистов и иностранных регулирующих органов. Особенно уязвимы сталелитейная и алюминиевая отрасли. Гармонизация данных системы торговли выбросами на уровне предприятий и методов оценки выбросов на уровне продукции может снизить бремя отчетности и сделать низкоуглеродное производство более коммерчески привлекательным.

- ***Взаимодействие с рынком электроэнергии останется решающим***. Цена на углерод может эффективно влиять на диспетчеризацию и инвестиции только в том случае, если цены на электроэнергию, работа сети и правила рынка

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

позволяют передавать ценовой сигнал. Дальнейшее торговля «зеленой» электроэнергией, интеграция возобновляемых источников энергии, хранение и передача могут усилить действие системы торговли выбросами. И наоборот, жесткая диспетчеризация или регулируемые тарифы могут ослабить ее эффект.

Для соответствия Парижскому соглашению критическим тестом после 2030 года станет вопрос о том, будут ли общие выбросы парниковых газов в Китае снижаться темпами, соответствующими Национальному плану по сокращению выбросов к 2035 году и цели достижения углеродной нейтральности к 2060 году. Система торговли выбросами может внести свой вклад, выравнивая предельные издержки на выбросы углерода по охватываемым источникам и выявляя, где сокращение выбросов является наиболее дешевым. Но ценообразование на углерод не может заменить инфраструктуру, инновации и отраслевые преобразования. Тяжелая промышленность потребует новых технологий; энергетическая система потребует крупномасштабной интеграции возобновляемых источников энергии, хранения и сетей; транспорт и здания потребуют электрификации и повышения энергоэффективности. Систему торговли выбросами лучше всего понимать как экономическую связующую нить между этими преобразованиями.

Заключение

В период с 2015 по 2025 год Китай преобразовал систему торговли квотами на выбросы из совокупности региональных экспериментов в общенациональный институт, охватывающий сектора экономики с наибольшим объемом выбросов. Развитие системы шло в тесной связи с эволюцией обязательств Китая в рамках Парижского соглашения: от первоначальных определяемых на национальном уровне вкладов 2015 года и ужесточенных целей на 2030 год до задач по достижению углеродной нейтральности («двойного углеродного статуса»), обновленных в 2021 году обязательств и целей на 2035 год, представленных в 2025 году. Национальная система торговли квотами начала функционировать осторожно — с электроэнергетического сектора, уделяя особое внимание показателям углеродоемкости, качеству данных и соблюдению нормативных требований. В дальнейшем система накопила опыт торгов, укрепила правовую базу, перезапустила национальный добровольный рынок и расширила охват, включив в него производство стали, цемента и алюминия.

Масштабы системы весьма значительны. Первый национальный цикл соблюдения обязательств охватывал объем выбросов около 4,5 Гт CO_2 в год; впоследствии охват электроэнергетического сектора достиг примерно 5,1–5,2 Гт. К 2025 г. под действие системы регулирования квот в четырех ключевых секторах подпадали 3378 предприятий-эмитентов. Совокупный объем торгов национальными углеродными квотами к концу 2025 г. достиг 865 млн тонн и

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

57,663 млрд юаней. Цены заметно выросли в течение 2024 г., когда стоимость на рынке впервые превысила 100 юаней за тонну, а затем несколько снизились в 2025 г., поскольку рынок вступил в новую фазу расширения и распределения квот. Эта динамика свидетельствует о том, что цена на углерод приобретает экономическую значимость, однако по-прежнему в значительной степени определяется архитектурой системы и сроками выполнения обязательств.

Ключевой аналитический вывод заключается в том, что китайская система ETS на данном этапе оказалась более успешной как механизм институционального строительства и регулирования углеродоемкости, нежели как инструмент жесткого ограничения абсолютного объема национальных выбросов. Это не случайность, а отражение стратегии развития страны и целей, установленных на период до 2030 г. Следующий этап будет иным. По мере того как Китай будет проходить пик выбросов, экологическая эффективность системы будет все больше зависеть от абсолютного дефицита квот, предсказуемого ужесточения ограничений, расширения отраслевого охвата, надежности процедур системы MRV, а также от более высокой ликвидности рынка.

В контексте Парижского соглашения система торговли квотами не является ни самодостаточной, ни второстепенной мерой. Это один из ключевых инструментов, позволяющих снизить затраты на достижение национальных климатических целей: компании с более дешевыми способами сокращения выбросов могут снижать их в больших объемах, тогда как предприятия с высокими издержками — приобретать квоты. Значимость этого механизма возрастает по мере ужесточения установленных лимитов или целевых показателей. Если Китай объединит меры по укреплению системы торговли квотами на выбросы с реформой электроэнергетического рынка, ускоренным внедрением экологически чистых источников энергии, промышленными инновациями и надежной долгосрочной политикой, то углеродный рынок может стать важнейшим механизмом трансформации целей на 2035 и 2060 годы в конкретные инвестиционные решения в масштабах крупнейшей промышленной экономики мира.

Литература

1. UNFCCC OON. Китай представляет план действий в области климата в преддверии принятия Парижского соглашения 2015 года. 2015.
2. Международное партнерство по действиям в области углеродных рынков (ICAP). Отчет о состоянии систем торговли квотами на выбросы в мире за 2015 год.
3. Международное партнерство по действиям в области углеродных рынков (ICAP). Профили национальной системы торговли квотами на выбросы (ETS) Китая и пилотных систем ETS в Китае; карта систем ETS. 2025.
4. https://icapcarbonaction.com/en/ets

© Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А., 2026

5. Springer Nature, журнал «Carbon Neutrality». Первый цикл выполнения обязательств в рамках национальной системы торговли квотами на выбросы в Китае: выводы и последствия. 2022.
6. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202407/W020240722528850763859.pdf
7. https://unfccc.int/news/china-submits-its-climate-action-plan-ahead-of-2015-paris-agreement
8. Шанхайская биржа окружающей среды и энергетики (Shanghai Environment and Energy Exchange). Обзор национального рынка торговли квотами на выбросы углерода в 2024 году.
9. Министерство экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики (MEE). Отчет о ходе развития национального углеродного рынка Китая. 2025.
10. MEE. Функционирование национального углеродного рынка в 2025 году: статистические данные по итогам года (торговые операции, выполнение обязательств, добровольный рынок). 2026.
11. UNFCCC OON. Определяемый на национальном уровне вклад (ОНУВ) Китая до 2035 года, представлен 3 ноября 2025 года.
12. MEE. Уведомление о завершении первого цикла выполнения обязательств на национальном углеродном рынке, 31 декабря 2021 года.

References

1. UNFCCC. China Submits its Climate Action Plan Ahead of 2015 Paris Agreement. 2015.
2. International Carbon Action Partnership (ICAP). Status Report: Emissions Trading Worldwide. 2015.
3. International Carbon Action Partnership (ICAP). China National ETS and Chinese pilot ETS profiles and ETS Map. 2025.
4. https://icapcarbonaction.com/en/ets
5. Springer Nature, Carbon Neutrality. The first compliance cycle of China’s National Emissions Trading Scheme: insights and implications. 2022.
6. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202407/W020240722528850763859.pdf
7. https://unfccc.int/news/china-submits-its-climate-action-plan-ahead-of-2015-paris-agreement
8. Shanghai Environment and Energy Exchange. Overview of the National Carbon Emissions Trading Market. 2024.
9. Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China (MEE). Progress Report of China’s National Carbon Market. 2025.
10. MEE. National carbon market operation in 2025, reporting year-end 2025 trading, compliance and voluntary-market statistics. 2026.
11. UNFCCC. China’s 2035 Nationally Determined Contribution, submitted 3 November 2025.
12. MEE. National carbon market first compliance cycle completion notice, 31 December 2021.

© Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., & Sinyugin O.A., 2026

УДК 620.91:621.311.243
DOI: 10.7868/S265867032603011X

Эколого-экономическая эффективность внедрения солнечных фотоэлектрических систем различной мощности в Кыргызской Республике: сетевые, автономные и гибридные сценарии

Кенжаев Идирисбек Гуламович
Ошский Государственный университет, Ош, Кыргызская Республика
ORCID: 0000-0002-8094-2553; e-mail:kenjaevig@rambler.ru

Турсунбаев Жанболот Жанышович
Ошский технологический университет, Ош, Кыргызская Республика
ORCID: 0009-0006-8465-7879*; e-mail:jhanbolot.72@gmail.com*

Ощепкова Эльвира Ахтемовна
Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
ORCID: 0000-0002-3800-5814*; e-mail:oshchepkova.elvira@gmail.com*

Шерматова Малика Бахрамовна
Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
ORCID: 0000-0002-3270-1915*; e-mail:mbshermatova@gmail.com*

Халиков Абдумалик Абдувахобович
Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
ORCID: 0009-0007-6279-3041*; e-mail:a.xoliqov0617@gmail.com*

Сиддиков Хусниддин Зайниддинович
Ташкентский государственный технический университет, Ташкент; Узбекистан
ORCID: 0009-0008-6716-3513*; e-mail:siddikovh0389@gmail.com*

Аннотация. В статье предложен сценарно-нормированный научно-методический подход к эколого-экономической оценке внедрения солнечных фотоэлектрических систем различной мощности в Кыргызской Республике. Рассмотрены три класса систем: малые солнечные фотоэлектрические станции до 10 кВт, объектовые СФЭС до 100 кВт и локальные мини-СФЭС до 1 МВт. Для каждого класса выполнено сравнение сетевого, автономного и гибридного сценариев применения с учетом доли самопотребления, емкости BESS (аккумуляторная система хранения

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

энергии), расхода дизельного топлива, предотвращенных выбросов CO_2, LCOE, срока окупаемости и капитальной стоимости предотвращения 1 т CO_2. Показано, что экологическая эффективность СФЭС в условиях Кыргызстана определяется не только установленной мощностью, но прежде всего базовым источником замещения: при работе в гидроориентированной сети эффект сокращения выбросов CO_2 является умеренным, тогда как при замещении дизельной генерации он возрастает кратно. Полученные зависимости и расчетная матрица сценариев могут использоваться для ранжирования проектов малой солнечной энергетики, автономного энергоснабжения социальных объектов, сельских территорий и удаленных потребителей Кыргызской Республики.

Ключевые слова: Кыргызская Республика, СФЭС, солнечная энергетика, малые ФЭС, автономное энергоснабжение, гибридная система, BESS, дизель-генератор, выбросы CO_2, LCOE, стоимость предотвращения выбросов, эколого-экономическая эффективность.

Для цитирования: Кенжаев И.Г., Турсунбаев Ж.Ж., Ощепкова Э.А., Шерматова М.Б., Халиков А.А., Сиддиков Х.З. Эколого-экономическая эффективность внедрения солнечных фотоэлектрических систем различной мощности в Кыргызской Республике: сетевые, автономные и гибридные сценарии // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. с. 174–189. DOI: 10.7868/S265867032603011X

Дата поступления в редакцию: 22.06.2026
Дата принятия к публикации: 22.09.2026

UDC620.91:621.311.243
DOI: 10.7868/S265867032603011X

Environmental and economic efficiency of implementing solar photovoltaic systems of different capacities in the Kyrgyz Republic: grid-connected, stand-alone, and hybrid scenarios

Idirisbek G. Kenjaev
Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic
ORCID: 0000-0002-8094-2553; e-mail: kenjaevig@rambler.ru

© Kenjaev I.G. et al., 2026

Zhanbolot Zh. Tursunbaev
Osh Technological University, Osh, Kyrgyz Republic
ORCID: 0009-0006-8465-7879; e-mail: jhanbolot.72@gmail.com

Elvira A. Oshchepkova
Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan
ORCID: 0000-0002-3800-5814; e-mail: oshchepkova.elvira@gmail.com

Malika B. Shermatova
Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan
ORCID: 0000-0002-3270-1915; e-mail: mbshermatova@gmail.com

Abdumalik A. Khalikov
Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan
ORCID: 0009-0007-6279-3041; e-mail: a.xoliqov0617@gmail.com

Khusniddin Z. Siddikov
Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan
ORCID: 0009-0008-6716-3513; e-mail: siddikovh0389@gmail.com

Abstract. The article proposes a scenario-based and normalized scientific-methodological approach to the environmental and economic assessment of the implementation of solar photovoltaic systems of different capacities in the Kyrgyz Republic. Three classes of systems are considered: small PV systems up to 10 kW, facility-scale PV systems up to 100 kW, and local mini-PV systems up to 1 MW. For each class, grid-connected, stand-alone, and hybrid deployment scenarios are compared, taking into account the self-consumption ratio, BESS capacity, diesel fuel consumption, avoided CO_2 emissions, LCOE, payback period, and the capital cost of avoiding 1 t of CO_2. It is shown that the environmental performance of PV systems under the conditions of Kyrgyzstan is determined not only by installed capacity, but primarily by the displaced energy source: when operating within a hydropower-dominated grid, the CO_2 reduction effect is moderate, whereas it increases severalfold when diesel generation is displaced. The obtained relationships and the calculated scenario matrix can be used for ranking small-scale solar energy projects, autonomous power supply systems for social facilities, rural areas, and remote consumers in the Kyrgyz Republic.

Keywords: Kyrgyz Republic, solar photovoltaic systems, solar energy, small-scale photovoltaic power plants, stand-alone power supply, hybrid system, BESS, diesel generator, CO_2 emissions, LCOE, cost of avoided emissions, environmental and economic efficiency.

For citation: Kenjaev I.G., Tursunbaev Zh.Zh., Oshchepkova E.A., Shermatova M.B., Khalikov A.A., Siddikov Kh.Z. (2026). Ecological and economic efficiency of

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

implementing solar photovoltaic systems of different capacities in the Kyrgyz Republic: grid-connected, autonomous and hybrid scenarios // *Journal of Environmental Earth and Energy Study. 2*. 174–189. doi: 10.7868/S265867032603011X

Received: 22.06.2026
Accepted: 22.09.2026

Введение

Развитие солнечных фотоэлектрических систем (СФЭС) в Кыргызской Республике становится актуальным не только в контексте крупной сетевой генерации, но и в сегменте малых, автономных и гибридных систем [1]. В предыдущих исследованиях по стратегическому развитию сетевых СФЭС ключевой задачей являлось определение безопасно-интегрируемой мощности, то есть такой мощности солнечной генерации, которая может быть подключена к конкретному узлу сети без нарушения режимных, технических и экономических ограничений [2]. В настоящей работе акцент переносится на эколого-экономическую сторону внедрения СФЭС: насколько целесообразны системы различной мощности, какой экологический эффект они дают и при каких условиях солнечная генерация становится наиболее эффективным инструментом снижения выбросов.

Особенность Кыргызской Республики состоит в высокой доле гидроэнергетики в структуре производства электроэнергии, которая снижает средний сетевой коэффициент выбросов CO_2, однако не отменяет экологической и экономической значимости СФЭС. Для удаленных объектов, горных территорий, насосных станций, социальных учреждений и телекоммуникационной инфраструктуры солнечная генерация может замещать дизельное топливо, уменьшать расходы на доставку топлива, снижать шумовое воздействие и локальные выбросы загрязняющих веществ [3]. Поэтому экологический эффект СФЭС должен оцениваться не одним универсальным коэффициентом, а через сценарий замещения: средняя сеть (средний сетевой фактор выбросов CO_2 энергосистемы Кыргызстана), маржинальная/дефицитная электроэнергия или дизельная генерация.

Цель настоящей статьи разработать расчетно-сценарную методику эколого-экономической оценки внедрения СФЭС различной мощности в Кыргызской Республике с учетом сетевых, автономных и гибридных схем энергоснабжения. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- классифицировать СФЭС по мощности и схеме применения;
- сформировать исходную расчетную базу по тарифам, стоимости топлива, CAPEX СФЭС, CAPEX Battery Energy Storage System (BESS), удельной выработке и коэффициентам выбросов;

© Kenjaev I.G. et al., 2026

- разработать алгоритм расчета выработки, самопотребления, предотвращенных выбросов CO_2 и экономического эффекта;
- выполнить сценарный эколого-экономический расчет для СФЭС 10 кВт, 100 кВт и 1 МВт;
- определить условия, при которых экологический эффект СФЭС максимален;
- сформировать рекомендации для программ развития малой солнечной энергетики Кыргызстана.

Научная значимость исследования заключается в разработке расчётно-сценарной методики эколого-экономической оценки СФЭС для гидроориентированной энергосистемы Кыргызской Республики, в которой гидроэлектростанции обеспечивают основную часть выработки электроэнергии. В отличие от традиционного подхода, экологический результат определяется через базовый источник замещения — среднюю сеть, маржинальную/дефицитную электроэнергию или дизельную генерацию, что позволяет корректно сравнивать сетевые, автономные и гибридные СФЭС+BESS-системы в единой системе показателей.

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенная расчетная схема может использоваться для ранжирования объектов малой солнечной энергетики в Кыргызской Республике по совокупности энергетических, экономических и экологических критериев. Методика позволяет определить, где солнечная генерация дает максимальный эффект: в сетевых объектах — за счет снижения нагрузки и импортозависимости или в удаленных и горных районах — за счет замещения дизельного топлива, сокращения затрат на его доставку, уменьшения локальных выбросов и повышения надежности энергоснабжения.

В работе рассматриваются типовые классы СФЭС, которые могут быть применены для домохозяйств, социальных объектов, коммерческих потребителей, фермерских хозяйств, насосных станций и локальных микросетей. Это позволяет сопоставить разные уровни мощности в единой системе показателей. В табл. 1 приведена классификация солнечных фотоэлектрических систем по диапазону мощности, типичным объектам применения, основному эффекту внедрения и ограничениям эксплуатации.

Для каждого уровня мощности рассматриваются три схемы применения:

- сетевая СФЭС без аккумулятора, работающая преимущественно на собственную нагрузку с возможной передачей избытка в сеть;
- автономная СФЭС с батарейным накопителем (BESS) для изолированной нагрузки;
- гибридная система СФЭС+BESS+ДГУ, где солнечная генерация снижает продолжительность работы дизель-генераторной установки.

Из-за высокой изменчивости цен на оборудование, топливо и финансовые условия расчет выполняется как сценарный, где используются базовые

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

инженерные параметры и диапазоны чувствительности. Методику можно адаптировать методику под конкретный регион, объект или инвестиционный проект. В Табл. 2 представлены исходные расчетные параметры, использованные для эколого-экономической оценки СФЭС, включая срок службы оборудования, удельную выработку, стоимость топлива, коэффициенты выбросов и сценарные допущения.

Таблица 1. *Классификация СФЭС по мощности и области применения*

Класс	**Мощность**	**Типичные объекты**	**Основной эффект**	**Ограничения**
Малая СФЭС	до 10 кВт	дом, малый офис, связь	снижение сетевого потребления или дизельного топлива	зависимость от графика нагрузки
Объектовая СФЭС	10–100 кВт	школа, больница, ферма, насосная станция	снижение расходов и локальных выбросов	необходимость учета самопотребления
Мини-СФЭС	100 кВт – 1 МВт	микросеть, агрокластер, поселковый объект	локальная генерация и снижение потерь	необходимость анализа сети и определения требуемой емкости BESS

Таблица 2. *Исходные расчетные параметры для эколого-экономической оценки*

Показатель	**Базовое значение**	**Диапазон / комментарий**	**Источник / обоснование**
Срок службы СФЭС	20 лет	задан в условиях исследования	сценарное допущение автора
Срок службы BESS	8 лет	замена на 8-м и при необходимости на 16-м году	сценарное допущение автора
Удельная выработка СФЭС	1450 кВт·ч/кВт·год	1200–1650 кВт·ч/кВт·год	Global Solar Atlas / PVOUT перспективных зон Кыргызстана [4]
Деградация СФЭС	0,5%/год	0,3–0,8%/год	распространенное инженерное допущение для c-Si модулей
Цена дизельного топлива	1,051 USD/л	91,88 KGS/л	GlobalPetrolPrices, 11.05.2026 [5]

© Kenjaev I.G. et al., 2026

Расход дизель-генератора	0,30 л/кВт·ч	0,25–0,35 л/кВт·ч	инженерный диапазон для малых ДГУ
Выбросы дизель-генератора	2,68 кг CO_2/л	прямые выбросы от сгорания топлива	стандартный коэффициент [6]
$EF_{диз}$	0,804 кг CO_2/кВт·ч	0,30 × 2,68	расчет автора
$EF_{сеть,сред}$	0,10 кг CO_2/кВт·ч	гидроориентированная сеть [7]	сценарное значение
$EF_{сеть,марж}$	0,45 кг CO_2/кВт·ч	импорт / тепловая / дефицитная энергия	сценарное значение
$EF_{ФЭС,ЖЦ}$	0,041–0,048 кг CO_2/кВт·ч	крышные и наземные СФЭС	IEA PVPS/NREL LCA-диапазон [8, 9]

Здесь EF — коэффициент удельных выбросов CO_2: $EF_{диз}$ — для электроэнергии дизель-генератора; $EF_{сеть,сред}$ — средний сетевой коэффициент; $EF_{сеть,марж}$ — маржинальный сетевой коэффициент для замещаемой генерации; $EF_{ФЭС,ЖЦ}$ — коэффициент жизненного цикла ФЭС.

В табл. 3 приведены сценарные капитальные затраты для СФЭС- и BESS-компонентов, а также принятые значения доли самопотребления и тарифов для оценки экономического эффекта СФЭС различной мощности.

Таблица 3. *Сценарные капитальные затраты и доля самопотребления*

Мощность СФЭС	**CAPEX СФЭС, USD/кВт**	**CAPEX BESS, USD/кВт·ч**	**Доля самопотребления для сетевой схемы**	**Тариф для оценки экономии**
10 кВт	900	350	0,70	0,018 USD/кВт·ч
100 кВт	750	300	0,60	0,043 USD/кВт·ч
1 МВт	650	250	0,50	0,043 USD/кВт·ч

Коэффициент самопотребления ($k_{сам}$) характеризует долю выработанной СФЭС электроэнергии, которая потребляется объектом непосредственно без передачи в сеть. Для сетевых систем принята более низкая доля полезного использования солнечной энергии, поскольку генерация не всегда совпадает с нагрузкой объекта. Для автономных систем с BESS принято $k_{сам}$ = 0,95, для гибридных СФЭС с BESS и дизельным резервом — $k_{сам}$ = 0,90; эти значения могут быть уточнены при наличии почасового графика нагрузки.

Для сопоставления результатов сформирована расчетная матрица сценариев A1–C3, в которой каждому уровню мощности поставлены в соответствие схема

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

применения, базовый источник замещения, доля полезного использования солнечной энергии и требуемая длительность накопления BESS (Таблица 4).

Таблица 4. *Расчетная матрица сценариев эколого-экономической оценки СФЭС*

Сцен.	P	Схема	Источник замещения	kсам	BESS, ч
A1	10 кВт	сетевая СФЭС	средняя сеть	0,70	0
A2	10 кВт	СФЭС+BESS	дизель / автономная нагрузка	0,95	4
A3	10 кВт	СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	0,90	2
B1	100 кВт	сетевая СФЭС	средняя сеть	0,60	0
B2	100 кВт	СФЭС+BESS	дизель / автономная нагрузка	0,95	4
B3	100 кВт	СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	0,90	2
C1	1 МВт	сетевая СФЭС	средняя / марж. сеть	0,50	0
C2	1 МВт	СФЭС+BESS	дизель / микросеть	0,95	4
C3	1 МВт	СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	0,90	2

1. Методика энергетического расчета

Годовая выработка СФЭС определяется по выражению:

$$E_{\text{фэс,год}} = P_{\text{фэс}} \cdot Y_{\text{уд}} \quad (1)$$

где $E_{\text{фэс,год}}$ — годовая выработка, кВт·ч/год; $P_{\text{фэс}}$ — установленная мощность, кВт; Yуд — удельная выработка, кВт·ч/кВт·год.

С учетом деградации модулей годовая выработка в t-й год составляет:

$$E_{\text{фэс},t} = E_{\text{фэс},1} \cdot \left(1 - d_{\text{фэс}}\right)^{t-1} \quad (2)$$

Полезно использованная солнечная энергия определяется как:

$$E_{\text{фэс,исп}} = E_{\text{фэс,год}} \cdot k_{\text{сам}} \quad (3)$$

Для систем с накопителем используется выражение для требуемой емкости BESS [10]:

$$E_{\text{нак}} = P_{\text{фэс}} \cdot \tau \quad (4)$$

© Kenjaev I.G. et al., 2026

где $E_{\text{нак}}$— требуемая емкость накопителя, кВт·ч; $P_{\text{фэс}}$— установленная мощность СФЭС, кВт; τ— расчетное время автономной работы накопителя, ч. В настоящем исследовании приняты два режима накопителя: $\tau = 4$ч для автономной схемы и $\tau = 2$ч для гибридной схемы с дизельным резервом.

2. Методика экологической оценки

Экологический эффект СФЭС определяется не только величиной годовой генерации, но и тем, какой источник энергии замещается. В гидроориентированной энергосистеме Кыргызстана средний сетевой коэффициент выбросов сравнительно низок. При при замещении дизельной генерации предотвращенные выбросы возрастают:

$$CO_{2,\text{пред}} = \frac{E_{\text{фэс,исп}} \cdot \left(EF_{\text{баз}} - EF_{\text{фэс,жц}}\right)}{1000} \quad (5)$$

где $EF_{\text{баз}}$— коэффициент удельных выбросов базового источника электроэнергии, кг CO_2/кВт·ч; $EF_{\text{ФЭС,ЖЦ}}$— коэффициент выбросов жизненного цикла СФЭС, кг CO_2/кВт·ч; $E_{\text{фэс,исп}}$— полезная годовая выработка СФЭС, кВт·ч/год.

$EF_{\text{баз}}$ выбирается по сценарию: средняя сеть, маржинальная/дефицитная энергия или дизельная генерация; $EF_{\text{ФЭС,ЖЦ}}$— жизненный углеродный след солнечной электроэнергии.

$$EF_{\text{диз}} = b_{\text{диз}} \cdot EF_{\text{топ}} = 0{,}30 \cdot 2{,}68 = 0{,}804 \ \frac{\text{кг } CO_2}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \quad (6)$$

где $b_{\text{диз}}$— удельный расход дизельного топлива, л/кВт·ч; $EF_{\text{топ}}$— коэффициент выбросов при сгорании дизельного топлива, кг CO_2/л.

Углеродный срок окупаемости может быть определен как:

$$T_{CO2,\text{ок}} = \frac{CO_{2,\text{встр}}}{CO_{2,\text{пред,год}}} \quad (7)$$

где $CO_{2,\text{встр}}$— встроенные (жизненного цикла) выбросы СФЭС, кг CO_2;
$CO_{2,\text{пред,год}}$— годовой объем предотвращенных выбросов CO_2, кг CO_2/год.

3. Методика экономической оценки

Приведенная стоимость электроэнергии LCOE рассчитывается по формуле [11]:

$$LCOE = \frac{CAPEX_{\text{общ}} + \sum_{t=1}^{N} \frac{OPEX_t + REP_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (8)$$

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

где $OPEX_t$ — эксплуатационные затраты в году t; REP_t — затраты на замену оборудования в году t; E_t — выработка электроэнергии в году t, кВт·ч; r — ставка дисконтирования; N — расчетный срок службы проекта, лет.

Для автономных и гибридных систем учитываются капитальные затраты на СФЭС, BESS, инверторное оборудование и монтаж [12-14]:

(9)

Экономия дизельного топлива определяется как:

(10)

(11)

где $C_{\text{диз}}$— стоимость дизельного топлива, USD/л.

В качестве эколого-экономического показателя использована стоимость предотвращения 1 т CO_2:

(12)

где $LCC_{\text{фэс}}$— приведенная стоимость электроэнергии для СФЭС, USD; — приведенная стоимость электроэнергии базового варианта, USD; — суммарный объем предотвращенных выбросов CO_2 за срок службы СФЭС, т CO_2.

Также рассчитывается капитальная стоимость предотвращения 1 т CO_2 за срок службы СФЭС:

(13)

Далее выполнен сценарный эколого-экономический расчет СФЭС для условий Кыргызской Республики. Расчет выполнен для базовой удельной выработки 1450 кВт·ч/кВт·год. Сценарии A1–C3 приняты согласно расчетной матрице, представленной в табл. 4. Для жизненного цикла 20 лет учитывается деградация 0,5 %/год, что дает суммарный коэффициент выработки за срок службы 19,08 от выработки первого года.

Суммарный коэффициент выработки за срок службы определен как

$$\sum_{t=1}^{20}(1 \quad 005) \tag{14}$$

что соответствует суммарной выработке за 20 лет относительно выработки первого года.

Табл. 5 отражает результаты сценарного эколого-экономического расчета для сетевых, автономных и гибридных СФЭС мощностью 10 кВт, 100 кВт и 1 МВт, включая показатели генерации, выбросов CO_2, расхода дизельного топлива, капитальных затрат и окупаемости.

© Kenjaev I.G. et al., 2026

Таблица 5. *Результаты сценарного эколого-экономического расчета*

P, кВт	**Сценарий**	**Базовый источник**	**$E_{исп}$, кВт·ч/год**	**BESS, кВт·ч**	**CAPEX, USD**	**CO_2, т/год**	**Дизель, л/год**	**$T_{ок}$, лет**	**CAPEX/CO_2, USD/т**
10	Сетевая СФЭС	средняя сеть	10150	0	9000	0,60	0	49,3	788
10	Автономная СФЭС+BESS	дизель / изолир. нагрузка	13775	40	23000	10,51	4132	5,3	115
10	Гибридная СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	13050	20	16000	9,96	3915	3,9	84
100	Сетевая СФЭС	средняя сеть	87000	0	75000	5,13	0	20,0	766
100	Автономная СФЭС+BESS	дизель / изолир. нагрузка	137750	400	195000	105,10	41325	4,5	97
100	Гибридная СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	130500	200	135000	99,57	39150	3,3	71
1000	Сетевая СФЭС	средняя сеть	725000	0	650000	37,70	0	20,9	904
1000	Автономная СФЭС+BESS	дизель / изолир. нагрузка	1377500	4000	1650000	1041,39	413250	3,8	83
1000	Гибридная СФЭС+BESS+ДГУ	дизельный резерв	1305000	2000	1150000	986,58	391500	2,8	61

Коэффициент экологического усиления показывает отношение предотвращенных выбросов в дизель-замещающем сценарии к сетевому сценарию:

(15)

При принятых исходных данных автономная СФЭС+BESS мощностью 10 кВт предотвращает около 10,51 т CO_2/год против 0,60 т CO_2/год для сетевой СФЭС, то есть эффект возрастает примерно в 17,5 раза. Для 100 кВт отношение составляет около 20,5 раза, а для 1 МВт — около 27,6 раза; следовательно,

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

экологическая эффективность определяется не только мощностью станции, но и типом замещаемого источника и долей полезного использования солнечной энергии.

В качестве сводной зависимости капитальная стоимость предотвращения 1 т CO_2 может быть представлена через стоимость оборудования, ресурс солнечной генерации, самопотребление, деградацию и коэффициент выбросов базового источника:

$$C \qquad \frac{}{\left(EF_{\text{баз}} - EF_{\text{фэс,жц}}\right)/} \qquad (16)$$

где $S_{\text{дег}}$— суммарный коэффициент выработки за срок службы с учетом деградации модулей и определяется следующим образом:

$$S_{\text{дег}} = [1–(1–d)^N]/d, \qquad (17)$$

где d— годовая деградация СФЭС, доли ед.; N— срок службы СФЭС, лет.

Деление на 1000 в (16) используется для перевода предотвращенных выбросов из кг CO_2 в т CO_2. Данная зависимость позволяет перейти от простого сравнения CAPEX к ранжированию проектов по экологической отдаче капитальных затрат.

Результаты показывают различие между сетевыми и дизель-замещающими сценариями. Для сетевой СФЭС 10 кВт экологический эффект составляет около 0,60 т CO_2/год, тогда как автономная СФЭС+BESS той же мощности при замещении ДГУ предотвращает около 10,5 т CO_2/год. Аналогичная закономерность сохраняется для 100 кВт и 1 МВт: максимальный экологический эффект достигается в сценариях, где солнечная генерация снижает работу дизель-генераторов.

4. Обсуждение результатов

Сценарный расчет подтверждает, что приоритетность внедрения СФЭС в Кыргызской Республике должна определяться не только стоимостью установленного киловатта, но и базовым источником энергии, который замещается солнечной генерацией. Если СФЭС работает параллельно с гидроориентированной сетью, то предотвращенные выбросы CO_2 по среднему сетевому фактору оказываются умеренными. Это не снижает значимость сетевых СФЭС: они разгружают гидроэнергетику, уменьшают импортную и дефицитную составляющую и повышают устойчивость отдельных узлов. Однако по критерию прямого климатического эффекта автономные и гибридные системы имеют более высокий приоритет там, где они замещают ДГУ.

Гибридные СФЭС с BESS и дизельным резервом демонстрируют более короткую простую окупаемость в расчетной модели, чем автономные СФЭС с BESS, поскольку требуют меньшей емкости аккумулятора и сохраняют ДГУ как резерв. Для удаленных объектов такой вариант может быть наиболее

© Kenjaev I.G. et al., 2026

реалистичным на первом этапе: солнечная генерация и батарея снижают расход топлива, а дизель обеспечивает надежность в периоды длительной облачности или повышенной нагрузки.

Для систем до 10 кВт наибольший практический эффект ожидается на объектах, где доставка топлива затруднена или электрическая нагрузка имеет дневной профиль. Для систем 100 кВт целевыми объектами являются школы, больницы, фермы, насосные станции и малые производственные площадки. Для систем до 1 МВт наиболее перспективны поселковые микросети, агрокластеры и локальные энергетические узлы, где СФЭС+BESS может снижать нагрузку на распределительную сеть и уменьшать зависимость от дизельного резерва.

5. Методологическая схема применения результатов

На Рис. 1 представлен алгоритм эколого-экономической оценки СФЭС, включающая выбор класса системы, схемы применения, расчет энергетических, экологических и экономических показателей, а также итоговое ранжирование проектов.



Рис. 1. *Методологический алгоритм эколого-экономической оценки СФЭС*

Схема на Рис.1 может использоваться как основа для прикладного отбора проектов, в которой сначала определяется класс СФЭС и тип нагрузки, затем выбирается схема применения, рассчитываются энергетические показатели, экологический эффект, экономические параметры и итоговая приоритетность объекта.

6. Практический результат и область применения

Практическим результатом исследования является расчетная матрица выбора СФЭС для трех уровней мощности — 10 кВт, 100 кВт и 1 МВт — и трех схем применения: сетевая СФЭС, автономная СФЭС+BESS и гибридная СФЭС+BESS+ДГУ. Расчеты показали, что при сетевом применении в гидроориентированной энергосистеме экологический эффект остается умеренным, тогда как при замещении дизельной генерации предотвращенные

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

выбросы CO_2 и экономия топлива возрастают кратно (Табл.5). Наиболее выраженный прикладной результат получен для гибридных систем, которые обеспечивают близкий к автономным системам экологический эффект, но требуют меньшей емкости BESS и имеют более короткий срок окупаемости.

Полученные результаты могут быть использованы органами энергетического планирования, проектными организациями и инвесторами при отборе объектов для малой солнечной энергетики. Для удаленных потребителей, социальных объектов, насосных станций, телекоммуникационной инфраструктуры и поселковых микросетей приоритетной становится не максимальная установленная мощность, а оптимальное сочетание $k_{сам}$, емкости BESS, дизельного резерва и стоимости предотвращения 1 т CO_2. Такой подход позволяет переходить от установки СФЭС «где есть солнце» к выбору объектов, где каждый солнечный киловатт работает с максимальной энергетической, экономической и экологической отдачей.

Заключение

Выполненное исследование показало, что эколого-экономическая эффективность СФЭС в Кыргызской Республике имеет ярко выраженный сценарный характер. Для гидроориентированной энергосистемы прямой эффект по снижению CO_2 при сетевом подключении является ограниченным, однако сетевые СФЭС сохраняют значение как инструмент разгрузки энергосистемы, снижения дефицитной и импортной составляющей, а также повышения устойчивости локальных узлов электроснабжения. Максимальный экологический эффект достигается в автономных и гибридных сценариях, где солнечная генерация замещает дизельную электроэнергию.

Предложенная методика позволяет оценивать СФЭС не только по CAPEX, LCOE и сроку окупаемости, но и по капитальной стоимости предотвращения 1 т CO_2, что особенно важно для государственных и региональных программ поддержки малой солнечной энергетики. Наиболее практически сбалансированным решением для удаленных объектов выступает гибридная схема СФЭС+BESS+ДГУ, сочетающая сокращение расхода топлива и выбросов с сохранением надежности энергоснабжения. Дальнейшее развитие исследования целесообразно связать с учетом почасовых графиков нагрузки, сезонностью солнечного ресурса, деградацией BESS и локальными сетевыми ограничениями.

Литература

1. Авезова Н.Р., И.Г. Кенжаев, Ж.Ж. Турсунбаев, Э.А. Ощепкова. Солнечная энергетика Кыргызской Республики как фактор энергетической безопасности и международного сотрудничества в Центральной Азии // Известия вузов Кыргызстана. – 2026. – № 2. – С. 23–38.

© Kenjaev I.G. et al., 2026

2. Авезова Н.Р., Жахонгиров И.Ж., Рахмонов А.Й., Махмудов С.М., Холиков А.А. Национальные потребности Узбекистана в солнечной энергетике и технологиях PV (2019–2024) // Development of Science. – 2025. – № 6. – С. 361–376.
3. АвезоваН.Р., РахимовЭ.Ю., ДалмурадоваН.Н., РузиевМ., ШерматоваМ.Б. Modeling and optimal planning of solar photovoltaic systems for reliable power supply to medical facilities // Science and Innovation. – 2025. – Vol. 4. – ISSN 2181-3337.
4. World Bank Group, Solargis. Global Solar Atlas: Kyrgyz Republic solar irradiation and PV power potential maps.
5. Global Petrol Prices. Kyrgyzstan diesel prices, 11-May-2026.
6. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. Chapter 2: Stationary Combustion.
7. GlobalPetrolPrices. Kyrgyzstan electricity prices, September 2025.
8. National Renewable Energy Laboratory. Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics. – NREL, 2012.
9. IEA PVPS Task 12. Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems: 2023 data update. – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2024.
10. Dobos A.P. PVWatts Version 5 Manual. NREL/TP-6A20-62641. – National Renewable Energy Laboratory, 2014.
11. U.S. Department of Energy. Levelized Cost of Energy (LCOE). – DOE Office of Indian Energy.
12. International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2024. – Abu Dhabi: IRENA, 2025.
13. International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2025. – Abu Dhabi: IRENA, 2025.
14. Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic, World Bank. Top solar energy zones: Sustainable competitive advantages. Presentation brochure. – 2024.

References

1. Avezova N.R., Kenzhaev I., Tursunbaev Zh., Oshchepkova E. Solar photovoltaic Power Plants in the Kyrgyz Republic as a Factor of Energy Security and Renewable Energy Cooperation in Central Asia // Izvestiia VUZov Kyrgyzstana. 2026. No. 2. P. 23–38.
2. Avezova N.R., Zhakhongirov I.Zh., Rakhmonov A.Y., Makhmudov S.M., Khalikov A.A. National Needs of Uzbekistan in Solar Energy and PV Technologies (2019–2024) // Development of Science. 2025. No. 6. P. 361–376.
3. Avezova N.R., Rakhimov E.Yu., Dalmuradova N.N., Ruziyev M., Shermatova M.B. Modeling and Optimal Planning of Solar Photovoltaic Systems for Reliable Power Supply to Medical Facilities // Science and Innovation. 2025. Vol. 4. ISSN 2181-3337.
4. World Bank Group, Solargis. Global Solar Atlas: Kyrgyz Republic Solar Irradiation and PV Power Potential Maps.
5. Global Petrol Prices. Kyrgyzstan Diesel Prices, 11-May-2026.
6. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. Chapter 2: Stationary Combustion.
7. Global Petrol Prices. Kyrgyzstan Electricity Prices, September 2025.

© Кенжаев И.Г. и др., 2026

8. National Renewable Energy Laboratory. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. NREL, 2012.
9. IEA PVPS Task 12. Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV Systems: 2023 Data Update. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2024.
10. Dobos A.P. PVWatts Version 5 Manual. NREL/TP-6A20-62641. National Renewable Energy Laboratory, 2014.
11. U.S. Department of Energy. Levelized Cost of Energy (LCOE). DOE Office of Indian Energy.
12. International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2024. Abu Dhabi: IRENA, 2025.
13. International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Statistics 2025. Abu Dhabi: IRENA, 2025.
14. Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic, World Bank. Top Solar Energy Zones: Sustainable Competitive Advantages. Presentation Brochure. 2024.

© Kenjaev I.G. et al., 2026

УДК 550.42:631.48
DOI: 10.7868/S2658670326030121

Редкоземельные элементы (Sm, Gd, Pr, Tb) в профилях солодей Нижнетавдинского и Ярковского районов Тюменской области

Ткаченко Никита Сергеевич
ФГАОУ Тюменский государственный университет, г. Тюмень, 625003, Россия
ORCID: 0009-0005-3919-6164; e-mail: nikita.tkachenko1998@mail.ru

Аннотация. Впервые для юга Тюменской области выполнена оценка содержания редкоземельных элементов Sm, Gd, Pr и Tb в профилях солодей (разрезы 19 и 28). Проведено нормирование на кларк земной коры, рассчитаны коэффициенты миграции и корреляция с глубиной. Установлено, что распределение РЗЭ определяется двумя типами процессов: биогенная аккумуляция (разрез 19, Нижнетавдинский район) и элювиально-иллювиальное перераспределение (разрез 28, Ярковский район). Показано, что выявленные тренды являются индикатором естественных почвообразовательных процессов — оглеения, осолодения и гумусонакопления. Полученные данные могут служить основой для регионального геохимического мониторинга и установления местных фоновых концентраций.

Ключевые слова: солоди, редкоземельные элементы, корреляция, Тюменская область.

Для цитирования: Ткаченко Н.С. Редкоземельные элементы (Sm, Gd, Pr, Tb) в профилях солодей Нижнетавдинского и Ярковского районов Тюменской области // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 190-198. DOI: 10.7868/S2658670326030121

Дата поступления в редакцию: 23.05.2026.
Дата принятия к публикации: 20.09.2026.

© Ткаченко Н.С., 2026

UDC 550.42:631.48
DOI: 10.7868/S2658670326030121

Rare earth elements (Sm, Gd, Pr, Tb) in the malt of the Nizhnetavdinsky and Yarkovsky districts of Tyumen region

Nikita S. Tkachenko
Tyumen State University, Tyumen, 625003, Russia
ORCID: 0009-0005-3919-6164; e-mail: nikita.tkachenko1998@mail.ru

Abstract. For the first time for the south of Tyumen region, the content of rare earth elements Sm, Gd, Pr and Tb in solondi profiles (sections 19 and 28) was assessed. Normalization to the Clark of the earth's crust was carried out, migration coefficients and correlation with depth were calculated. It was found that the distribution of REE is determined by two types of processes: biogenic accumulation (section 19, Nizhnetavdinsky district) and eluvial-illuvial redistribution (section 28, Yarkovsky district). It is shown that the identified trends are an indicator of natural soil-forming processes — gleying, solodization and humus accumulation. The obtained data can serve as a basis for regional geochemical monitoring and establishment of local background concentrations.

Keywords: solondi, rare earth elements, clarke, Tyumen region.

For citation: Tkachenko N.S. (2026). Rare earth elements (Sm, Gd, Pr, Tb) in the malt of the Nizhnetavdinsky and Yarkovsky districts of Tyumen region. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 190–198. doi: 10.7868/S2658670326030121 (in Russ.).

Received: 23.05.2026.
Accepted: 20.09.2026.

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки фонового состояния почвенного покрова в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Редкоземельные элементы (РЗЭ) обладают высокой диагностической ценностью, отражая процессы элювиирования, иллювиирования, биогенной аккумуляции и оглеения [1, 2]. Солоди — гидроморфные и полугидроморфные почвы, широко распространённые в подтаёжной и лесостепной зонах Западной Сибири [3, 4]. На юге Тюменской области они формируются в условиях застойно-промывного водного режима [5].Особый интерес представляет изучение не только широко мониторируемых элементов, но и менее исследуемых редкоземельных металлов, к которым относится самарий (Sm), гадолиний (Gd), празеодим (Pr) и тербий (Tb) [6]. Их поведение в почвенных

© Tkachenko N.S., 2026

профилях солодей, особенно в условиях разной гидротермики и геохимической обстановки, изучено недостаточно [7].

Цель работы — впервые охарактеризовать содержание и внутрипрофильное распределение Sm, Gd, Pr, Tb в солодях Нижнетавдинского (разрез 19) и Ярковского (разрез 28) районов, а также выполнить их геохимическую интерпретацию с использованием нормирования на кларк и расчёта коэффициентов миграции.

1. Материалы и методы

Исследования проводились на юге Тюменской области в пределах двух административных районов: Нижнетавдинский район (разрез 19) — солодь, заложенная в подтаёжной зоне на элементе рельефа с затруднённым дренажем. Ярковский район (разрез 28) — солодь, заложенная в аналогичных ландшафтных условиях. Территория характеризуется плоским, слаборасчленённым рельефом с широким развитием гидроморфных почв. Оба разреза находятся на элементах рельефа, испытывающих периодическое переувлажнение, что является диагностическим признаком солодей [8].

Почвенные разрезы заложены и описаны в соответствии с общепринятыми методиками [9, 10]. Отбор образцов проводился послойно с интервалом 20 см. Содержание Sm, Gd, Pr, Tb определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в условиях аккредитованной аналитической лаборатории [11]. Статистическая обработка (коэффициент корреляции Пирсона) выполнена с использованием программного обеспечения Microsoft Excel [12]. Нормирование проведено на кларки литосферы по А.П. Виноградову [13]. Коэффициент миграции (Кмигр) определён как отношение максимального содержания элемента в профиле к минимальному [14].



Рис. 1. *Схема расположения разреза 19*

© Ткаченко Н.С., 2026



Рис.2. *Разрез 19 — солодь, Нижнетавдинский район Тюменской области.*

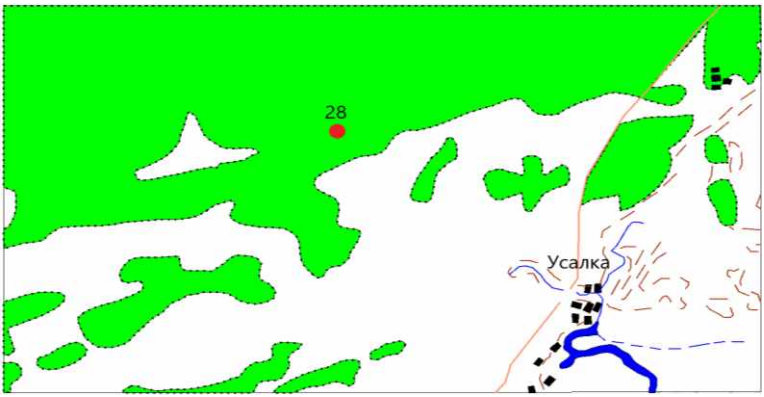


Рис. 3. *Схема расположения разреза 28*

© Tkachenko N.S., 2026



Рис. 4. *Разрез 28 — солодь, Ярковский район Тюменской области.*

Таблица 1. *Координаты разрезов*

19	57.48849 65.78803
28	57.34085 66.87033

2. Результаты и их обсуждение

Разрез 19 (Нижнетавдинский район):

Максимальное содержание всех РЗЭ отмечено в слое 0–20 см (Pr — 4,68 мг/кг, Sm — 4,25 мг/кг). С глубиной содержание резко снижается к слою 40–60 см, затем остаётся стабильно низким. Такой тип распределения характерен для биогенной аккумуляции в верхней части профиля [15]. Органогенный горизонт (A1) накапливает РЗЭ за счёт растительного опада и корневых выделений. Отсутствие второго пика указывает на слабо выраженный иллювиальный процесс.

© Ткаченко Н.С., 2026

Разрез 28 (Ярковский район):

Распределение двухвершинное: первый пик в слое 40–60 см (Pr — 3,41 мг/кг, Sm — 2,93 мг/кг); второй, более высокий пик — в слое 120–140 см (Pr — 4,39 мг/кг, Sm — 4,24 мг/кг). Такой тип распределения указывает на элювиально-иллювиальный процесс с аккумуляцией РЗЭ в нижней части профиля [16]. Первый пик (40–60 см) может быть связан с временным задержанием на границе смены гранулометрического состава (песок → лёгкий суглинок). Второй пик (120–140 см) — с аккумуляцией на иллювиальном барьере, что характерно для солодей с выраженным оглеением.В таблице 2 приведены коэффициенты концентрации (Kk = содержание в почве / кларк литосферы). Кларки: Sm = 4,5 мг/кг, Gd = 3,8 мг/кг, Pr = 1,8 мг/кг, Tb = 0,9 мг/кг [8].

Таблица 2. *Содержание Sm, Gd, Pr, Tb в солодях (мг/кг)*

Разрез	Глубина, см	Sm	Gd	Pr	Tb
19	0–20	4,25	3,83	4,68	0,50
19	20–40	3,11	3,01	3,35	0,40
19	40–60	2,23	2,08	2,40	0,26
19	60–80	2,40	2,26	2,87	0,27
19	80–100	2,09	2,08	2,41	0,26
28	0–20	2,59	2,39	3,15	0,31
28	20–40	2,65	2,39	3,33	0,31
28	40–60	2,93	2,69	3,41	0,36
28	60–80	2,55	2,39	2,96	0,32
28	80–100	3,39	3,14	3,83	0,32
28	100-120	3,75	3,48	3,92	0,47
28	120-140	4,24	3,98	4,39	0,52

Таблица 3. *Коэффициенты концентрации (Kk) РЗЭ*

Разрез	Глубина, см	Характер	Kk(Sm)	Kk(Gd)	Kk(Pr)	Kk(Tb)
19	0-20	Максимум	0,94	1,01	2,60	0,56
19	80-100	Минимум	0,46	0,55	1,34	0,29
28	120-140	Максимум	0,94	1,05	2,44	0,58
28	60-80	Минимум	0,57	0,63	1,64	0,36

Празеодим (Pr) устойчиво обогащён относительно кларка (Kk до 2,60), что может свидетельствовать о его биогенном накоплении в условиях гумусонакопления [17]. Самарий (Sm) и гадолиний (Gd) близки к кларку или слегка обеднены, что характерно для элементов с умеренной миграционной способностью. Тербий (Tb) заметно обеднён (Kk 0,29–0,58), что указывает на его вынос в условиях гидроморфизма и восстановительной обстановки [18].

© Tkachenko N.S., 2026

Коэффициент миграции (Кмигр)

Кмигр = Cmax / Cmin в пределах профиля. Чем выше коэффициент, тем интенсивнее перераспределение элемента.

Таблица 4. *Коэффициенты миграции РЗЭ*

Элемент	Разрез 19	Разрез 28
Sm	2,03	1,66
Gd	1,84	1,67
Pr	1,95	1,48
Tb	1,92	1,68

Для разреза 19 коэффициенты миграции выше (1,84–2,03), что указывает на более интенсивное перераспределение РЗЭ под влиянием биогенных процессов. Для разреза 28 значения ниже (1,48–1,68), что говорит о более равномерном распределении, характерном для элювиально-иллювиального механизма [13].

Рассчитан коэффициент корреляции Пирсона между содержанием каждого элемента и глубиной отбора.

Таблица 5. *Корреляция РЗЭ с глубиной (r)*

Элемент	Разрез 19	Разрез 28
Sm	–0,92	+0,94
Gd	–0,89	+0,95
Pr	–0,88	+0,96
Tb	–0,91	+0,93

Для разреза 19 — сильная отрицательная корреляция (r от –0,88 до –0,92): с глубиной содержание РЗЭ закономерно снижается. Для разреза 28 — сильная положительная корреляция (r от +0,93 до +0,96): с глубиной содержание РЗЭ возрастает, достигая максимума в нижней части профиля. Это принципиальное различие отражает разные типы почвообразования: в разрезе 19 доминирует биогенная аккумуляция, в разрезе 28 — элювиально-иллювиальное перераспределение [14, 15].

Для обоснования фонового характера содержаний РЗЭ в солодях юга Тюменской области проведено сравнение полученных данных с опубликованными средними значениями для почв Западной Сибири. Сопоставление показывает, что концентрации Sm, Gd, Pr и Tb в исследуемых почвах находятся в пределах или ниже средних значений для ненарушенных аналогов [5, 7]. Это позволяет рассматривать их вертикальное распределение, прежде всего, как результат природных геохимических и почвенных процессов, а не антропогенного воздействия.

Настоящая работа является первым исследованием, в котором для территории юга Тюменской области:

© Ткаченко Н.С., 2026

- определены содержания Sm, Gd, Pr, Tb в профилях солодей с шагом 20 см;
- выполнено нормирование на кларк земной коры;
- рассчитаны коэффициенты миграции;
- установлены сильные корреляции РЗЭ с глубиной (r от –0,96 до +0,96).

Заключение

1. Содержание РЗЭ в исследованных солодях варьирует в следующих пределах: Sm — 2,09–4,25 мг/кг; Gd — 2,08–3,98 мг/кг; Pr — 2,40–4,68 мг/кг; Tb — 0,26–0,52 мг/кг.
2. В разрезе 19 (Нижнетавдинский район) распределение убывающее с максимумом в слое 0–20 см, что свидетельствует о биогенной аккумуляции. В разрезе 28 (Ярковский район) распределение возрастающее с двумя пиками (максимум в слое 120–140 см), что указывает на элювиально-иллювиальный процесс.
3. Нормирование на кларк земной коры показало: обогащение празеодимом (Pr) — Kk до 2,60; обеднение тербием (Tb) — Kk до 0,29; самарий (Sm) и гадолиний (Gd) близки к кларку.
4. Коэффициенты миграции выше для разреза 19 (1,84–2,03), что говорит о более интенсивном перераспределении РЗЭ под влиянием биогенных процессов.
5. Установлены сильные корреляции РЗЭ с глубиной: разрез 19 — r от –0,88 до –0,92 (отрицательные); разрез 28 — r от +0,93 до +0,96 (положительные).
6. Выявленные тренды являются индикатором естественных почвообразовательных процессов (оглеения, осолодения, гумусонакопления). Полученные данные могут служить основой для регионального геохимического мониторинга и установления местных фоновых концентраций.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н. Редкоземельные элементы в почвах // Почвоведение. 2012. № 2. С. 115–130.
2. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems // Plant and Soil. 2004. Vol. 267. P. 191–206.
3. Классификация почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2004. 342 с.
4. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: МГУ, 2004. 460 с.
5. Козловская Е.Г., Медведева Н.А. Почвы Тюменской области. Новосибирск: Наука, 2010. 210 с.
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. М.: Недра, 1996. 350 с.
7. Каретин Л.Н. Почвы юга Тюменской области. Тюмень, 2007. 180 с.
8. Зайдельман Ф.Р. Генезис и мелиорация гидроморфных почв. М.: Колос, 2005. 320 с.
9. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: МГУ, 2004. 432 с.
10. Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А. Субстантивно-генетическая классификация почв России // Почвоведение. 2019. № 4. С. 387–399.
11. Reimann C., de Caritat P. Chemical Elements in the Environment: Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 398 p.

© Tkachenko N.S., 2026

12. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
13. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
14. Добровольский В.В. География микроэлементов. М.: Мысль, 2007. 240 с.
15. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, 2011. 520 p.
16. Laveuf C., Cornu S. A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes // Geoderma. 2009. Vol. 154. P. 1–12.
17. Zhang C., Wang L., Nie Z. Geochemistry of rare earth elements in soils // Journal of Rare Earths. 2012. Vol. 30. P. 1040–1045.
18. Aubert D., Stille P., Probst A. REE fractionation during granite weathering // Chemical Geology. 2001. Vol. 178. P. 43–56.
19. Mihaljevič M., Ettler V., Šebek O. REE distribution in soil profiles // Environmental Chemistry Letters. 2006. Vol. 4. P. 147–152.
20. Aide M.T., Dunn C. REE in Missouri soils // Soil Science. 2006. Vol. 171. P. 646–657.

Reference

1. Vodyanitsky Yu.N. Rare earth elements in soils // Soil Science. 2012. No. 2. pp. 115-130.
2. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems // Plants and soil. 2004. Volume 267. pp. 191-206.
3. Classification of soils of Russia. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2004. 342 p.
4. Dobrovolsky G.V., Urusevskaya I.S. Geography of soils. Moscow: MSU, 2004. 460 p.
5. Kozlovskaya E.G., Medvedeva N.A. Soils of the Tyumen region. Novosibirsk: Nauka Publ., 2010. 210 p.
6. Ivanov V.V. Ecological geochemistry of elements. Moscow: Nedra, 1996. 350 p.
7. Karetin L.N. Soils of the south of the Tyumen region. Tyumen, 2007. 180 p.
8. Seidelman F.R. Genesis and reclamation of hydromorphic soils. Moscow: Kolos, 2005. 320 p.
9. Rozanov B.G. Morphology of soils. Moscow: MSU, 2004. 432 p.
10. Gerasimova M.I., Gubin S.V., Shoba S.A. Substantial genetic classification of Russian soils. 2019. No. 4. pp. 387-399.
11. Reiman K., de Carita P. Chemical elements in the environment: reference books for geochemists and environmental scientists. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 398 p.
12. Lakin G.F. Biometrics. Moscow: Higher School, 1990. 352 p.
13. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust // Geochemistry. 1962. No. 7. pp. 555-571.
14. Dobrovolsky V.V. Geography of trace elements. Moscow: Mysl, 2007. 240 p.
15. Kabata-Pendias A. Microelements in soils and plants. CRC Press, 2011. 520 p.
16. Laveuf K., Cornu S. An overview of the possibilities of rare earth elements for tracking geogenetic processes // Geoderma. 2009. Volume 154. pp. 1-12.
17. Zhang S., Wang L., Ne Z. Geochemistry of rare earth elements in soils // Journal of Rare Earths. 2012. Volume 30. pp. 1040-1045.
18. Ober D., Stille P., Probst A. Fractionation of REE during granite weathering // Chemical Geology. 2001. Volume 178. pp. 43-56.
19. Mikhalevich M., Ettler V., Shebek O. Distribution of REE in soil profiles // Letters on Environmental Chemistry. 2006. Volume 4. pp. 147-152.
20. Eid M.T., Dann K. RI in the soils of Missouri // Soil Science. 2006. Volume 171. pp. 646-657.

© Ткаченко Н.С., 2026

УДК 551.581.1
DOI: 10.7868/S2658670326030133

Особенности изменений годового и месячного облучения Земли в фазах нутационного цикла

Фёдоров Валерий Михайлович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-2305-7408; e-mail: fedorov.msu@mail.ru

Шурыгина Анастасия Алексеевна
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-3920-6500; e-mail: shur.a17@yandex.ru

Фролов Денис Максимович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-0307-8175; e-mail: denisfrolovm@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования изменений годового и месячного облучения Земли в фазах нутационного цикла в интервале от 2007 по 2053 гг. Определено, что в фазу уменьшения наклона оси происходит уменьшение интенсивности годового облучения в высоких широтах и ее увеличение в низких широтах. В фазу увеличения наклона оси, наоборот, увеличение интенсивности годового облучения отмечается в высоких широтах, а уменьшение – в низких. Среднее для 5-ти градусной широтной зоны сокращение и увеличение в фазах уменьшения наклона оси интенсивности годового облучения составляет 0,022 Вт/м^2 и 0,006 Вт/м^2, соответственно. Среднее для 5-ти градусной широтной зоны сокращение и увеличение в фазах увеличения наклона оси интенсивности годового облучения составляет 0,004 Вт/м^2 и 0,013 Вт/м^2 соответственно. В фазу уменьшения наклона оси в первое астрономическое полугодие в Северном полушарии интенсивность месячного облучения уменьшается (в среднем для 5-ти градусной широтной зоны на 0,018 Вт/м^2), в Южном полушарии – увеличивается (в среднем на 0,023 Вт/м^2). Во второе астрономическое полугодие интенсивность месячного облучения в Северном полушарии увеличивается (в среднем на 0,012 Вт/м^2), а в Южном полушарии уменьшается (в среднем на 0,055 Вт/м^2). В фазу увеличения наклона оси в первое астрономическое полугодие интенсивность облучения в Северном полушарии возрастает (в среднем на 0,018 Вт/м^2), а в Южном полушарии – сокращается (в среднем на 0,011 Вт/м^2). Во второе астрономическое полугодие месячная интенсивность облучения в Северном полушарии снижается (в среднем на 0,010 Вт/м^2), а в Южном – увеличивается (в среднем на 0,025 Вт/м^2).

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

Ключевые слова: инсоляция Земли, наклон оси вращения, периодические вариации, нутационный цикл, интенсивность облучения

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственных заданий МГУ имени М.В. Ломоносова «Проблемы освоения Арктической зоны РФ: опасные экзогенные процессы и риски природопользования», «Цифровые технологии и методы картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования в географических исследованиях» и «Лавины, сели и смежные опасные природные процессы: оценка, моделирование и управление рисками».

Для цитирования: Федоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М. Особенности изменений годового и месячного облучения Земли в фазах нутационного цикла // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. С. 199–218. DOI: 10.7868/S2658670326030133

Дата поступления в редакцию: 11.07.2026
Дата принятия к публикации: 20.09.2026

UDC 551.581.1
DOI: 10.7868/S2658670326030133

Peculiarities of changes in annual and monthly irradiation of the Earth in the phases of the nutation cycle

Valery M. Fedorov
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-2305-7408; e-mail: fedorov.msu@mail.ru

Anastasia A. Shurygina
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-3920-6500; e-mail: shur.a17@yandex.ru

Denis M. Frolov
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-0307-8175; e-mail: denisfrolovm@mail.ru

Abstract. Studies were conducted to explore changes in the annual and monthly irradiation of the Earth during the phases of the nutation cycle in the period from 2007 to 2053. It was determined that during the phase of decreasing axial tilt, the intensity of annual irradiation decreases at high latitudes and increases at low latitudes. Conversely, during

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

the phase of increasing axial tilt, an increase in the intensity of annual irradiation is observed at high latitudes, and a decrease at low latitudes. The average decrease and increase in the intensity of annual irradiation during the phases of decreasing axial tilt for a 5-degree latitude zone are 0.022 W/m^2 and 0.006 W/m^2, respectively. The average decrease and increase in the intensity of annual irradiation during the phases of increasing axial tilt for a 5-degree latitude zone are 0.004 W/m^2 and 0.013 W/m^2, respectively. During the decreasing axial tilt phase in the first astronomical half of the year, the monthly irradiation intensity decreases in the Northern Hemisphere (by 0.018 W/m2 on average for a 5-degree latitude zone) and increases in the Southern Hemisphere (by 0.023 W/m^2 on average). During the second astronomical half of the year, the monthly irradiation intensity increases in the Northern Hemisphere (by 0.012 W/m^2 on average) and decreases in the Southern Hemisphere (by 0.055 W/m^2 on average). During the increasing axial tilt phase in the first astronomical half of the year, the irradiation intensity increases in the Northern Hemisphere (by 0.018 W/m^2 on average) and decreases in the Southern Hemisphere (by 0.011 W/m^2 on average). In the second astronomical half of the year, the monthly radiation intensity in the Northern Hemisphere decreases (by an average of 0.010 W/m^2), while in the Southern Hemisphere it increases (by an average of 0.025 W/m^2).

Keywords: Earth's insolation, tilt of the rotation axis, periodic variations, nutation cycle, irradiation intensity

Acknowledgments. T **.** This work was completed within the framework of the state assignments of Lomonosov Moscow State University: "Problems of Development of the Arctic Zone of the Russian Federation: Hazardous Exogenous Processes and Risks of Nature Management," "Digital Technologies and Methods of Cartography, Geoinformatics , and Remote Sensing in Geographical Research," and "Avalanches, Mudflows, and Related Hazardous Natural Processes: Risk Assessment, Modeling, and Management".

For citation: Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M. (2026). Features of changes in annual and monthly irradiation of the Earth in the phases of the nutation cycle. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 199–218. doi: 10.7868/S2658670326030133 (in Russ.).

Received: 11.07.2026
Accepted: 20.09.2026

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

Введение

Расчеты, учитывающие периодические возмущения наклона оси вращения Земли, элементов земной орбиты и связанные с ними высокочастотные вариации солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы (ВГА) были начаты Борисенковым Е.П. с коллегами в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова [Borisenkov et al., 1983, 1985]. В дальнейшем расчеты периодических вариаций инсоляции с различным временным разрешением и для различных периодов времени проводились в институте астрономии и геофизики имени Г. Леметра в Бельгии [Loutre et al., 1992; Bertrand et al., 2002; Yui, Berger, 2026]. Такие расчеты также выполнялись в Национальном технологическом университете (Буэнос-Айрес, Аргентина) и в Гарвард-Смитсоновском центре астрофизики (Кембридж, США) [Cionco, Soon, 2017] на основе астрономических эфемерид DE-431. Расчеты периодических вариаций облучения выполнялись в МГУ имени М.В. Ломоносова [Fedorov, Kostin, 2020; Федоров, Костин, 2026] на основе высокоточных астрономических эфемерид DE-441.

Отличия выполненных в МГУ имени М.В. Ломоносова высокочастотных вариаций инсоляции от методов Е.П. Борисенкова, М.-Ф. Лутр, С. Бертрана, Р. Сионко и их коллег связаны с используемыми в расчетах исходными астрономическими данными, с различным решением расчетов инсоляции относительно поверхности Земли и временному интервалу, охваченному расчетами. В качестве исходных данных Е.П. Борисенковым с коллегами использовались эфемериды, рассчитанные в Институте теоретической астрономии Академии наук СССР. Исходными данными для расчетов, выполненных бельгийскими исследователями [Loutre et al., 1992; Bertrand et al., 2002], были эфемериды VSOP82 [Bretagnon, 1982]. В выполненных в МГУ расчетах использовались JPL (Jet Propulsion Laboratory) *Planetary and Lunar Ephemerides* DE-406 [Standish, 1982; Giorgini et al., 1996; http://ssd.jpl.nasa.gov] и DE-441 [Folkner et al., 2014]. Сионко и Сун использовали в расчетах астрономические эфемериды DE-431 [Cionco, Soon, 2017].

Поверхность Земли при расчетах инсоляции отождествлялась нашими коллегами со сферой, и расчеты выполнялись только для отдельных параллелей (широт). Е.П. Борисенковым с коллегами [Borisenkov et al., 1983, 1985] получены значения только для параллелей 20°, 40°, 60° и 80° с.ш. В исследованиях бельгийских ученых [Loutre et al.,1992] расчеты выполнялись (на середину июля, точнее для точки с геоцентрической долготой равной 120°) только для параллели 65° с.ш., для точек равноденствия и солнцестояния – для экватора и параллелей 30°, 60° и 90° в каждом полушарии (то есть, всего для 5 дней года). Напомним, что геоцентрическая долгота Солнца – это угол между направлением из центра Земли на точку весеннего равноденствия и Солнце. Точки весеннего и осеннего равноденствия – это точки пересечения плоскости земной орбиты (эклиптики или фазовой плоскости) с плоскостью небесного экватора [Бакулин и др. 1983].

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

В выполненных в МГУ расчетах поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом, и приходящая радиация рассчитывалась не на отдельные параллели (широты), а на поверхность (с разрешением по широте и долготе в 1°), учитывалось изменение продолжительности тропического года. При этом, различия в облучении сферы и эллипсоида оказались соизмеримыми с вариациями солнечной активности (TSI – Total Solar Irradiance) в 11 летнем цикле в настоящее время [Федоров и др., 2020].

Нашими предшественниками анализировались амплитудно-периодические характеристики рассчитанных вариаций [Loutre et al., 1992; Bertrand et al., 2002; Cionco, Soon, 2017]. Пространственная локализация периодических вариаций облучения позднее исследовалась лишь в самом общем виде [Федоров, 2014, 2015, 2023; Федоров, Фролов, 2019, 2025]. Пространственно-временные особенности периодических вариаций ранее не изучались. Целью работы является определение особенностей пространственно-временных изменений интенсивности годового и месячного облучения Земли в фазах нутационного цикла.

1. Методы и результаты исследований

Наклон оси вращения Земли (или наклон плоскости экватора к плоскости эклиптики) в период с 2000 по 2050 уменьшается. На фоне тенденции уменьшения наклона оси проявляется 19-ти летний нутационный цикл, связанный с возмущающим действием Луны на ось вращения Земли [Дарвин, 1965; Бакулин и др., 1983] (рис. 1).



Рис. 1. *Изменение угла наклона оси вращения Земли*

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

В период с 2000 по 2060 гг. отмечаются три максимума (2007 г. – 23,44087°, 2024 г. – 23,43838°, 2043 г. – 23,43594°) и три минимума угла наклона оси вращения (2017 г. – 23,43458°, 2035 г. – 23,43204°, 2053 г. – 23,42959°). В работе анализируются изменения интенсивности годового и месячного облучение на ВГА в трех фазах уменьшения и двух фазах увеличения наклона оси в нутационном цикле в интервале от 2007 по 2053 гг.

Методика расчета облучения

Ранее были выполнены расчеты инсоляции на 12000 лет в прошлое и на 8000 лет в будущее (относительно 2000 года). Инсоляция Земли (энергия облучения – ЭО, Дж, удельная энергия облучения – УЭО, Дж/м^2 и интенсивность облучения – ИО, Вт/м^2) рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид DE-441 [http://ssd.jpl.nasa.gov; Folkner et al., 2014] для всей поверхности эллипсоида Земли. Исходными данными для расчетов инсоляции были: склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего координатного времени (Coordinate Time – CT) и всемирного корректируемого времени (Universal Time – UT). 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:

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

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n-й фрагмент m-го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), 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/м^2), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Напомним, что тропическим годом называется промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия [Бакулин и др., 1983]. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2 [Kopp, Lean, 2011]. Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли солнечной энергии изложена в [Fedorov, Kostin, 2020; Федоров, Костин 2026]. При этом, вариации солнечной активности (значения TSI по результатам известных реконструкций), в дальнейшем легко учитываются в рассчитанных данных инсоляции [Федоров и др., 2021; Федоров, 2023].

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

2. Изменение годового облучения Земли в нутационном цикле

По ранее выполненным расчетам определялись значения интенсивности годового облучения 5-ти градусных широтных зон Земли в годы экстремальных значений угла наклона оси ее вращения (2007, 2017, 2024, 2035, 2043, 2053). Затем проводилось последовательное вычитание соответствующих для широтных зон значений интенсивности облучения. При этом из интенсивности облучения в 5-ти градусной широтной зоне года окончания фазы вычиталась интенсивность облучения в соответствующей широтной зоне года начала фазы. В результате было получено изменение интенсивности годового облучения Земли по 5-ти градусным широтным зонам в фазы увеличения и уменьшения наклона оси (рис. 2).

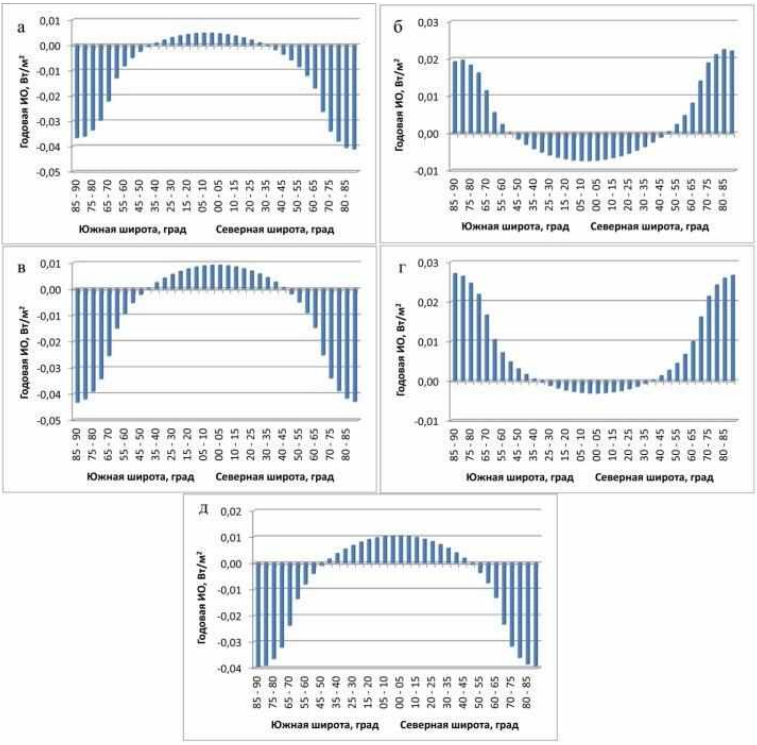


Рис. 2. *Изменение интенсивности годового облучения Земли в фазах нутационного цикла по 5-ти градусным широтным зонам:*

а – фаза уменьшения наклона оси 2007–2017 гг., б – фаза увеличения наклона 2017–2024 гг., в – фаза уменьшения наклона оси 2024–2035 г., г – фаза увеличения наклона оси 2035–2043 г., д – фаза уменьшения наклона оси 2043–2053 гг.

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

Основные особенности в изменении интенсивности годового облучения Земли в фазах нутационного цикла проявляются в том, что в фазу уменьшения наклона оси происходит уменьшение интенсивности облучения (ИО) в высоких широтах и увеличение ИО в низких широтах. В фазу увеличения наклона оси, наоборот, увеличение ИО отмечается в высоких широтах, а уменьшение – в низких. Однако области увеличения и уменьшения годовой ИО в различных нутационных циклах различаются (рис. 2).

Также отличаются и числовые значения изменения годовой ИО в соответствующих широтных зонах и фазах разных нутационных циклов. Так, например, в фазу уменьшения наклона 2007–2017 гг. (рис. 2а), увеличение годовой ИО отмечается в диапазоне от 40° ю.ш. до 30° с.ш. (в среднем для широтной зоны на 0,003 Вт/м^2), область уменьшения годовой ИО (в среднем на 0,019 Вт/м^2) в Южном полушарии охватывает пространство от 40° ю.ш. до 90° ю.ш., в Северном полушарии от 30° с.ш. до 90° с.ш. (в среднем сокращение составляет 0,019 Вт/м^2). В фазу увеличения наклона оси 2017–2024 гг. (рис. 2б) уменьшение годовой ИО отмечается в области от 50° ю.ш. до 45° с.ш. (в среднем на 0,005 Вт/м^2). В Южном полушарии годовая ИО увеличивается на пространстве от 50° ю.ш. до Южного географического полюса в Северном полушарии от 45° с.ш. до Северного географического полюса. В среднем для 5-ти градусной широтной зоны увеличение годовой ИО в Южном полушарии в этой фазе нутационного цикла составляет 0,012 Вт/м^2, в Северном полушарии – 0,013 Вт/м^2. В фазы уменьшения наклона 2024–2035 гг. (рис. 2в) и 2043–2053 гг. (рис. 2д) области увеличения годовой ИО, как и области уменьшения совпадают. Уменьшение отмечается в пространстве от 45° до 90° ю.ш. в Южном полушарии в среднем на 0,024 Вт/м^2 и 0,022 Вт/м^2 в фазы 2024–2035 гг. и 2043–2053 гг., соответственно. В Северном полушарии сокращение годовой ИО отмечается в том же диапазоне (45°–90°) северных широт в среднем на 0,024 Вт/м^2 и 0,022 Вт/м^2 в фазы 2024–2035 гг. и 2043–2053 гг., соответственно. Увеличение годовой ИО в диапазоне 45° с.ш. – 45° ю.ш (в обоих случаях) в среднем составляет 0,006 Вт/м^2 и 0,007 Вт/м^2 в фазы 2024–2035 гг. и 2043–2053 гг., соответственно. В фазу увеличения наклона оси 2035–2043 гг. (рис. 2г) уменьшение годовой ИО приходится на широтный диапазон от 35° с.ш. до 35° ю.ш. (в среднем на 0,002 Вт/м^2). Области увеличения годовой ИО в этой фазе цикла локализованы в широтных диапазонах от 35° до 90° в каждом полушарии. В среднем увеличение годовой ИО в каждом из полушарий составляет 0,013 Вт/м^2. Среднее для широтной зоны сокращение и увеличение годовой ИО в фазах уменьшения наклона оси составляет 0,022 Вт/м^2 и 0,006 Вт/м^2, соответственно. Среднее для широтной зоны сокращение и увеличение годовой ИО в фазах увеличения наклона оси составляет 0,004Вт/м^2 и 0,013 Вт/м^2 соответственно.

Максимальные вариации в нутационных циклах характерны для полярных ячеек (85–90°) обоих полушарий. Здесь ИО сокращается приблизительно на 0,024% в фазу уменьшения, и возрастает на 0,016% в фазу

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

увеличения наклона оси. Размах колебаний в этой зоне составляет около 0,03% от средней за период 2007–2053гг. интенсивности годового облучения этих полярных зон.

С трендом уменьшения наклона оси отмечаемым в современную эпоху связана тенденция сокращения приходящей солнечной радиации в высокие широты и увеличения ее поступления в низкие широты [Миланкович, 1939; Федоров 2020]. Нутационные вариации в фазу уменьшения угла наклона усиливают отмеченную тенденцию облучения, а в фазу увеличения наклона оси – ее ослабляют.

3. Изменение месячного облучения Земли в нутационном цикле

На основе ранее рассчитанных данных [Федоров, Костин 2026] были построены матрицы среднемесячной интенсивности облучения в 5-ти градусных широтных зонах для экстремальных лет в нутационных циклах. Затем матрицы вычитались, при этом из матрицы года окончания фазы вычиталась матрица года начала фазы. В результате получены 5 матриц пространственно-временного изменения ИО в двух фазах увеличения и в трех фазах уменьшения нутационного цикла (рис. 3).

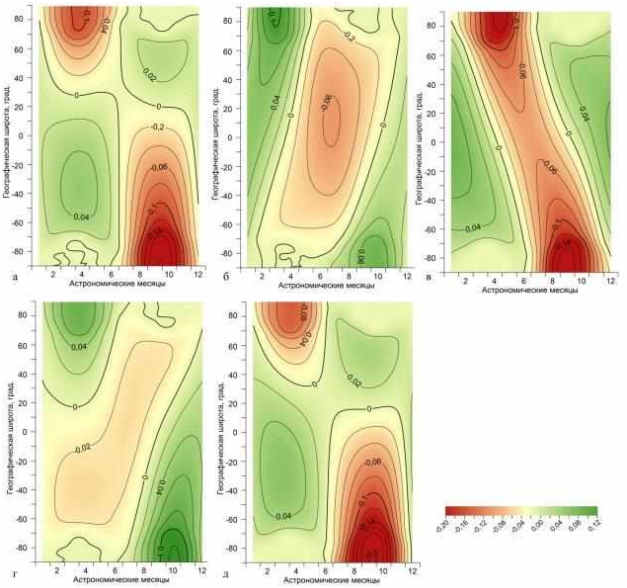


Рис. 3. *Пространственно-временные изменения интенсивности облучения Земли (Вт/м^2) в фазах нутационного цикла:*

а – фаза уменьшения наклона оси 2007–2017 гг., б – фаза увеличения наклона 2017–2024 гг., в – фаза уменьшения наклона оси 2024–2035 г., г – фаза увеличения наклона оси 2035–2043 г., д – фаза уменьшения наклона оси 2043–2053 гг.

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

Анализ полученных матриц разностей среднемесячного облучения 5-ти градусных широтных зон позволил определить особенности изменения месячной интенсивности облучения в фазах нутационного цикла. Так, в фазу уменьшения наклона оси в первое астрономическое полугодие в Северном полушарии интенсивность месячного облучения уменьшается, а в Южном полушарии увеличивается. Во второе астрономическое полугодие интенсивность месячного облучения в Северном полушарии увеличивается, а в Южном полушарии уменьшается. В фазу увеличения наклона оси в первое астрономическое полугодие интенсивность месячного облучения в Северном полушарии увеличивается, а в Южном уменьшается. Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии уменьшается, а в Южном увеличивается (рис. 3, табл.). Представленные в таблице значения получены осреднением месячных значений интенсивности облучения в 5-ти градусных широтных зонах за астрономические полугодия в Северном и Южном полушариях.

***Таблица 1**. Средние разности интенсивности облучения в полугодиях и полушариях в фазы уменьшения и увеличения наклона оси вращения Земли, Вт/м^2*

Полугодие	Фаза уменьшения наклона оси		Фаза увеличения наклона оси	
	СП	ЮП	СП	ЮП
Первое	-0,018	0,023	0,018	-0,011
Второе	0,012	-0,055	-0,010	0,025

Примечание: СП – Северное полушарие, ЮП – Южное полушарие

При этом на данном интервале (2007–2053 гг.) отмечается некоторый дисбаланс в изменении средней интенсивности облучения Земли за полугодия в полушариях в фазах нутационного цикла. В среднем общее увеличение ИО составляет 0,020 Вт/м^2, а общее сокращение 0,024 Вт/м^2.

Отмеченные в таблице особенности проявляются на всем временном интервале охваченном исследованиями (2007–2053 гг.). Однако, пространственные и временные границы областей увеличения и уменьшения интенсивности облучения и ее значения в этих областях изменяются от цикла к циклу. Рассмотрим подробнее различия в изменении месячной интенсивности облучения в фазах уменьшения и увеличения наклона оси.

В первое астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в фазу уменьшения наклона оси от 2007 до 2017 года (рис. 3а) сокращается в среднем для 5-ти градусной широтной зоны на 0,168 Вт/м^2, в Южном полушарии она увеличивается, в среднем на 0,023 Вт/м^2. Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в среднем увеличивается на 0,068 Вт/м^2, а в Южном сокращается на 0,059 Вт/м^2. В фазу уменьшения наклона оси от 2024 до 2035 (рис. 3в) года в первое астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в среднем

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

уменьшается на 0,029 Вт/м^2, а в Южном возрастает на 0,022 Вт/м^2. Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в среднем увеличивается на 0,017 Вт/м^2, а в Южном сокращается на 0,045 Вт/м^2. В фазе уменьшения наклона оси от 2043 до 2053 (рис. 3д) года в первое астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в среднем уменьшается на 0,009 Вт/м^2, а в Южном увеличивается на 0,025 Вт/м^2. Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии увеличивается в среднем на 0,011 Вт/м^2, а в Южном уменьшается на 0,061 Вт/м^2. Таким образом, при проявлении во всех трех фазах уменьшения наклона оси отмеченных в таблице особенностей числовые характеристики месячной ИО средние за полугодия в полушариях заметно различаются. В таблице представлены средние по всем трем фазам уменьшения наклона значения разности месячной ИО в конце и начале фаз нутационного цикла.

В фазах увеличения наклона оси при сохранении отмеченных в таблице особенностей, числовые значения среднего увеличения или уменьшения интенсивности месячного облучения в полугодиях и полушариях также отличаются в разных нутационных циклах. Величина месячной ИО в фазу увеличения наклона от 2017 до 2024 (рис. 3б) года в первое астрономическое полугодие в Северном полушарии в среднем увеличивается на 0,023 Вт/м^2, а в Южном уменьшается на 0,005 Вт/м^2. Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии в среднем уменьшается на 0,016 Вт/м^2, а в Южном увеличивается на 0,011 Вт/м^2. В фазу увеличения от 2025 до 2043 (рис. 3г) года месячная ИО в Северном полушарии в первое астрономическое полугодие в среднем возрастает на 0,14 Вт/м^2, а в Южном сокращается на 0,016 Вт/м^2. Во второе астрономическое полугодие ИО в Северном полушарии в среднем уменьшается на 0,006 Вт/м^2, а в Южном увеличивается на 0,038 Вт/м^2. В таблице представлены средние по двум фазам увеличения наклона значения разности ИО в конце и начале фаз нутационного цикла.

Также отмечаются изменения размеров и, расположения в матрицах полей увеличения и уменьшения месячной ИО в рассматриваемых фазах нутационных циклов. При анализе пространственно-временной локализации интенсивности облучения за максимальные изменения нами условно принимаются и рассматриваются значения увеличения или уменьшения месячной ИО превышающие по модулю 0,04 Вт/м^2.

В фазу уменьшения от 2007 до 2017 года (рис. 3а) в первое астрономическое полугодие максимальное сокращение месячной ИО отмечается для 4 астрономического месяца (приблизительно июль) в области севернее 75° широты, где оно превышает 0,1 Вт/м^2. В широтной зоне 85–90° с.ш. месячная ИО во 2, 3, 4 и 5 астрономический месяц (а.м.) сокращается на 0,056 Вт/м^2, 0,095 Вт/м^2, 0,104 Вт/м^2 и 0,08 Вт/м^2 соответственно. Сокращение месячной ИО в эти месяцы увеличивается с возрастанием географической широты. В Южном полушарии ИО в 8, 9, 10 и 11 астрономические месяцы в широтной зоне 85°–90°

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

ю.ш. сокращается на 0,117 Вт/м^2, 0,175 Вт/м^2, 0,167 Вт/м^2 и 0,1 Вт/м^2 соответственно. Максимальные увеличение месячной ИО в этой фазе нутационного цикла отмечаются в Южном полушарии в 3 и 4 астрономические месяцы в области от 15° ю.ш. до 50° ю.ш., где изменения ИО составляют от 0,04 до 0,05 Вт/м^2 с максимумом в широтной зоне 35°–40° ю.ш. В Северном полушарии наибольшее увеличение месячной ИО отмечается в период с 8 по 11 астрономический месяц. Область наибольшего увеличения ИО локализована в широтном диапазоне от 35° с.ш. до 65° с.ш. Увеличение месячной ИО находится в этой области в пределах от 0,021 Вт/м^2 до 0,029 Вт/м^2.

В фазу уменьшения угла наклона оси от 2024 до 2035 года (рис. 3в) максимальное сокращение месячной ИО характерно для высоких широт в обоих полушариях. В Северном полушарии максимальные сокращения месячной ИО отмечаются в летний период, а в Южном – в весенний. В 3, 4 и 5 астрономические месяцы в широтной зоне 85°–90° с.ш. месячная ИО сокращается на 0,1 Вт/м^2, 0,143 Вт/м^2 и 0,132 Вт/м^2 соответственно. Сокращение ИО в эти месяцы увеличивается с увеличением широты. В Южном полушарии в широтной зоне 85°–90° ю.ш. в 8, 9 и 10 астрономические месяцы ИО уменьшается на 0,139 Вт/м^2, 0,171 Вт/м^2 и 0,237 Вт/м^2 соответственно. С уменьшением широты сокращение ИО в эти месяцы уменьшается.

Максимальное увеличение месячной ИО в Северном полушарии в этой фазе приходится на весенне-зимнее, а в Южном полушарии на осенне-летнее время. В 1 астрономический месяц (приблизительно апрель) в Северном полушарии увеличение ИО отмечается в широтной области от экватора до 55° с.ш., во 2 а.м – в широтной области от экватора до 35° с.ш. В этих областях увеличение месячной ИО в эту фазу цикла сокращается с увеличением широты от 0,073 Вт/м^2 и 0,060 Вт/м^2 в зоне 00°–05° с.ш. до 0,041 Вт/м^2 в зоне 50°–55° с.ш. и 0,043 Вт/м^2 в зоне 25°–30° с.ш. в 1 и 2 а.м. соответственно. В Южном полушарии увеличение ИО сокращается от 0,074 Вт/м^2 и 0,062 Вт/м^2 в зоне 00°–05° ю.ш. в 1 и 2 а.м. соответственно, до 0,042 Вт/м^2 в зоне 55°–60° ю.ш. Таким образом, увеличение ИО в эти месяцы в данной области обоих полушарий сокращается с увеличением географической широты. Также заметное (> 0,04 Вт/м^2) увеличение ИО отмечается в Северном полушарии в 11 и 12 а.м. в области от экватора до 60° с.ш. Так в 12 а.м. в широтной зоне 55°–60° с.ш. оно составляет 0,040 Вт/м^2, а зоне 00°–05° с.ш. – 0,064 Вт/м^2. В Южном полушарии увеличение ИО в 1 и 2 а.м. возрастает с уменьшением широты. Так в 1 а.м. в широтной зоне 55°–60° ю.ш. оно составляет 0,042 Вт/м^2, а вблизи экватора (00°–05° ю.ш.) – 0,074 Вт/м^2.

В фазу уменьшения наклона оси от 2043 до 2053 года (рис. 3г) области наибольших изменений месячных ИО отмечаются в полушариях в весенне-летний период. В Северном полушарии область максимального сокращения месячной ИО (первое астрономическое полугодие) локализована в широтном диапазоне севернее 55° с.ш., где с увеличением широты сокращение ИО

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

возрастает (например, в 4 а.м. от 0,043 Вт/м^2 в зоне 55°–60° с.ш. до 0,094 Вт/м^2 в зоне 85° 90° с.ш.). В Южном полушарии область заметных сокращений месячной ИО (второе астрономическое полугодие) более обширна. Она простирается от 10° ю.ш. до 90° ю.ш. При этом, сокращение ИО также возрастает с увеличением широты (например, в 9 а.м. от 0,048 Вт/м^2 в зоне 10°–15° ю.ш. до 0,2 Вт/м^2 в зоне 85°–90° ю.ш.). Область увеличения месячной ИО в Северном полушарии приходится на второе полугодие, она локализована в пространстве приблизительно от 15° с.ш. до 70° с.ш., и проявляется во все месяцы полугодия. Увеличение месячной ИО в Северном полушарии в этой фазе цикла невелико, в среднем около 0,03 Вт/м^2. В Южном полушарии область увеличения месячной ИО более обширна, она (первое астрономическое полугодие) охватывает пространство от экватора до 55° ю.ш. и приходится на 2–4 а.м. Увеличение месячной ИО в этой области составляет от 0,041 Вт/м^2 до 0,057 Вт/м^2.

В фазах уменьшения наклона оси изменения месячной ИО характеризуются большой пространственно-временной изменчивостью. В фазах увеличения наклона оси пространственно-временные изменения ИО более стабильны.

В фазу увеличения наклона оси от 2017 до 2024 (рис. 3б) года сокращение месячной ИО отмечается в Северном полушарии в летне-осенний, а в Южном полушарии в зимне-весенний период (6–8 а.м.). Области сокращения месячной ИО занимают пространство от экватора до 55° с.ш. в Северном полушарии и от экватора до 35° ю.ш. – в Южном. Максимальное сокращение ИО отмечается в 7 а.м. в пространстве от 5° ю.ш. до 30° с.ш. Увеличение месячной ИО в этой фазе в полушариях отмечается в весенне-летние периоды. В Северном полушарии увеличение ИО приходится на 1–4 астрономические месяцы. Область увеличения месячной ИО занимает пространство от экватора до 45° с.ш. в 1 а.м., во 2 а.м. – всего полушария, в 3 а.м. – широтный диапазон от 25° с.ш. до 90° с.ш., в 4 а.м. – от 55° с.ш. до 90° с.ш. Во 2–4 а.м. увеличение ИО возрастает с увеличением широты (например, в 3 а.м. от 0,043 Вт/м^2 в широтной зоне 25°–30° с.ш. до 0,104 Вт/м^2 в широтной зоне 85°–90° с.ш.). В 1 а.м. отмечается обратная тенденция. В Южном полушарии область наибольшего увеличения месячной ИО отмечается в 9–11 а.м. и локализована в более узком широтном диапазоне от 55°–60° ю.ш. до 90° ю.ш. Для всех отмеченных месяцев (9–11 а.м.) с увеличением широты отмечается увеличение месячной ИО (например, в 10 а.м. от 0,044 Вт/м^2 в широтной зоне 55°–60° ю.ш. до 0,075 Вт/м^2 в широтной зоне 85°–90° ю.ш.).

В фазу увеличения наклона оси от 2035 до 2043 года (рис. 3д) отмечается в общем сходная, с предыдущей фазой увеличения наклона оси, картина. Области максимального увеличения месячной ИО приходятся в полушариях на весенне-летние периоды. В Северном полушарии (2–5 а.м.) наибольшее увеличение месячной ИО отмечается в широтной области от 60° с.ш. до 90° с.ш.

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

(например, в 3 а.м. ИО изменяется от 0,048 Вт/м^2 в широтной зоне 60°–65° с.ш. до 0,074 Вт/м^2 в зоне 85°–90° с.ш.) Для всех отмеченных (2–5) астрономических месяцев отмечается увеличение ИО с увеличением широты. В Южном полушарии область максимального увеличения месячной ИО (8–11 а.м.) более обширна при этом ее пространство возрастает от весны к лету. В 8 а.м. она локализована в широтной области от 75° ю.ш. до 90° ю.ш., в 11 а.м. простирается от экватора до Южного географического полюса. Сокращения месячной ИО в этой фазе отмечается в полушариях в основном в осенне-зимнее время. Максимальные сокращения месячной ИО в полушариях не велики (менее 0,03 Вт/м^2). Таким образом, в соответствующих фазах уменьшения и увеличения наклона оси облучение в разных нутационных циклах различается. Изменяются границы и пространственно-временная локализация областей положительных и отрицательных изменений месячных ИО в соответствующих фазах нутационных циклов. Однако, при этом соблюдается отмеченная для них выше основная особенность (табл. 1).

Изменения пространственных и временных границ областей увеличения и уменьшения интенсивности облучения и ее значений в фазах нутационного цикла могут определяться возмущениями орбитального движения Земли Луной и ближайшими планетами (Венера, Марс). Эти возмущения происходят в фазовой плоскости и изменяют расстояние между Землей и Солнцем. Вследствие этого в облучении Земли (которое обратно пропорционально квадрату расстояния) проявляются малые вариации с периодом 2 и 3 года, образующие последовательные серии продолжительностью 8 (2+3+3) и 11 (2+3+3+3) лет в сумме составляющие 19-ти летний цикл Метона [Федоров, 2014]. Цикл Метона известен давно и основан на том, что 19 солнечных лет почти точно равны 235 лунным месяцам.

Отмеченная 2 и 3 летняя периодичность, вероятно, связана с соизмеримостью в средних движениях Земли с ближайшими планетами Марсом и Венерой. Известно, что в параметрах движений планет и их спутников выдерживается ряд интересных соотношений, вследствие наличия соизмеримостей и резонансов [Белецкий, 1972; Молчанов, 1973; Гребенников, Рябов, 1978; Рой, 1981]. Условия резонанса определяются равенством частот вынужденных (под действием внешней силы) и собственных колебаний [Блехман, 1971]. Рассмотрим это подробнее. Сидерическим, или звездным, периодом обращения планеты называется промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите. Сидерический период Венеры составляет 224,701 суток (0,61521 тропического года), Марса – 686,980 суток (1,88089 тропического года), Земли (звездный год) – 365,526 суток (1,00004 тропического года). Частоты обращения планет ($\omega = 2\pi/\mathrm{T}$) составляют для Венеры 0,0279624 суток$^{-1}$, для Марса – 0,0091460 суток$^{-1}$, для Земли – 0,0171894 суток$^{-1}$. Отсюда следует $2\omega_{\text{Марса}}$ (0,0182920 суток$^{-1}$) – $\omega_{\text{Земли}}$ (0,0171894 суток$^{-1}$) = 0,0011026 суток$^{-1}$ и $3\omega_{\text{Венеры}}$

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

(0,0838872 суток$^{-1}$) – $5\omega_{Земли}$ (0,085947 суток$^{-1}$) = -0,0020598. Это свидетельствует о том, что в орбитальных движениях Земли с ближайшими планетами Марсом и Венерой существует соизмеримость (форма связи орбитальных объектов). При этом орбитальный резонанс Земли с Марсом равен 2/1, Земли с Венерой – 5/3 [Белецкий, 1972; Гребенников, Рябов, 1978]. Таким образом, через каждые 2 земных года взаимные положения Земли с Марсом и через 3 года Земли с Венерой относительно Солнца повторяются. С этими повторениями могут быть связаны периодические возмущения орбитального движения Земли в фазовой плоскости (расстояния Земля – Солнце и продолжительности тропического года в соответствии с третьим законом Кеплера) и, следовательно, вариации поступающей к Земле солнечной радиации.

Кроме того, изменения пространственных и временных границ областей увеличения и уменьшения интенсивности облучения и ее значений в фазах нутационного цикла могут быть связаны с возмущающим действием Луны в фазовой плоскости (в плоскости эклиптики) – синодической вариацией (с периодом около месяца). Синодическая вариация в облучении Земли отражает эффект лунно-солнечного фазового прилива, изменяющего расстояние между Землей и Солнцем и, следовательно, интенсивность облучения Земли [Сидоренков, 2015; Федоров, 2016].

Вариации интенсивности облучения в нутационном цикле невелики (менее 0,2 Вт/м^2). Тем не менее, они сопоставимы с вариациями солнечной активности в 11-ти летнем цикле (где амплитуда колебаний составляет 0,07% от 1361 Вт/м^2). Сопоставляя полученные нами максимальные значения колебаний ИО (0,2 Вт/м^2) с 342 Вт/м^2 (поскольку площадь сферы на которую рассчитывается облучение в 4 раза больше площади диска на которую определяется полный поток солнечного излучения) получаем 0,059%. Таким образом, относительные величины вариаций разной физической природы в этих циклах сопоставимы.

Однако эти малые вариации происходят регулярно и в связи с этим возможно появление, параметрических резонансов в природной системе с вынуждающими вариациями входного энергетического сигнала. Кроме того, возможен эффект стохастического резонанса – отклика бистабильной или метастабильной нелинейной системы на слабый периодический сигнал при шумовом воздействии определенной мощности [Блехман, 1971; Приливы и резонансы.., 1975; Резонансы.., 2006; Анищенко и др., 1999, 2006]. Отмеченные колебания инсоляции можно считать слабыми периодическими сигналами для природной системы Земли при шумовом воздействии. В случае резонанса амплитуда отмеченных колебаний в природной системе может значительно возрастать. Такой резонанс возможен при малом внешнем, но многократном воздействии на систему [Блехман, 1971].

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

Заключение

В фазу уменьшения наклона оси происходит уменьшение годовой интенсивности облучения в высоких широтах и увеличение в низких широтах. В фазу увеличения наклона оси, наоборот, увеличение годовой ИО отмечается в высоких широтах, а уменьшение – в низких. Однако области увеличения и уменьшения годовой ИО в различных нутационных циклах различаются. Также отличаются и числовые значения изменения годовой ИО в широтных зонах для разных нутационных циклов. Среднее для широтной зоны сокращение и увеличение в фазах уменьшения наклона оси годовой ИО составляет 0,022 Вт/м^2 и 0,006 Вт/м^2, соответственно. Среднее для широтной зоны сокращение и увеличение в фазах увеличения наклона оси годовой ИО составляет 0,004Вт/м^2 и 0,013 Вт/м^2 соответственно.

В фазу уменьшения наклона оси в первое астрономическое полугодие в Северном полушарии интенсивность месячного облучения уменьшается (в среднем на 0,018 Вт/м^2), а в Южном полушарии увеличивается (в среднем на 0,023 Вт/м^2). Во второе астрономическое полугодие интенсивность месячного облучения в Северном полушарии увеличивается (в среднем на 0,012 Вт/м^2), в Южном – уменьшается (в среднем на 0,055 Вт/м^2). В фазу увеличения наклона оси в первое астрономическое полугодие интенсивность облучения в Северном полушарии увеличивается (в среднем на 0,018 Вт/м^2), а в Южном – уменьшается (в среднем на 0,011 Вт/м^2). Во второе астрономическое полугодие месячная ИО в Северном полушарии уменьшается (в среднем на 0,010 Вт/м^2), а в Южном – увеличивается (в среднем на 0,025 Вт/м^2). Однако, границы и площадь пространственно-временной локализации областей увеличения и уменьшения месячной ИО в разных нутационных циклах меняются, как и ее числовые значения.

В фазах уменьшения угла наклона оси отмечаются эффекты увеличения сокращения месячной ИО с увеличением широты и сокращения увеличения месячной ИО с увеличением широты. В фазах увеличения наклона оси отмечается эффект возрастания увеличения месячной ИО с увеличением географической широты.

Полученные результаты могут оказаться полезными при точных расчетах радиационного баланса Земли ее поверхности и атмосферы, а также использоваться в радиационном блоке физико-математических моделей климата.

Литература

1. Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский – Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения порядка // Успехи физических наук, 1999. Т. 169. № 1. С. 7–38.
2. Анищенко В.С., Ануфриева М.В., Вадивасова Т.Е. Стохастический резонанс в бистабильной системе под воздействием хаотического сигнала // Письма в ЖТФ, 2006. Т. 32(20). С. 12–17.

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

3. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1983. 560 с.
4. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1972. 360 с.
5. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
6. Гребенников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
7. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
8. Молчанов А.М. О резонансной структуре Солнечной системы / Современные проблемы небесной механики и астродинамики. М.: Наука, 1973. С. 32–42.
9. Рой А. Движение по орбитам. М.: Мир, 1981. 544 с.
10. Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера, 2015. Т.15. № 3. С. 5–26.
11. Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады РАН, 2014. Т. 457. № 2. С. 222–225. DOI: 10.7868/S0869565214200213.
12. Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Доклады РАН, 2015. Т. 460. № 3. С. 339–342. DOI: 10.7868/S0869565215030196.
13. 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.
14. Федоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // Гео риск, 2020. Т. 14. № 4. С. 16–29. DOI:10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29
15. Федоров В.М. Проблемы параметризации радиационного блока в физико-математических моделях климата и возможности их решения // Успехи физических наук, 2023. Т. 193. № 9. С. 971–988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339
16. Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // Космические исследования, 2019. Т. 57. № 3. С. 177–184. DOI:10.1134/S002342061903004X.
17. Федоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М. Влияние формы Земли на характеристики облучения земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера, 2020. Т. 19. № 3, С. 119–130. DOI: 10.21455/GPB2020.3-7
18. Федоров В.М., Фролов Д.М., Веласко Эррера Н.М., Сун В.Х.В, Сионко Р.Г. Роль радиационного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена // Геофизические процессы и биосфера, 2021. Т. 20. № 3. С. 5–19. DOI: 10.21455/GPB2021.3-1
19. Федоров В.М., Фролов Д.М. Изменение солярного климата Земли в период от1900 до 2100 г. // Солнечно-земная физика, 2025. Т. 11. № 2. С. 15–21. DOI: 10.12737/szf-112202502
20. Федоров В.М., Костин А.А. Расчет характеристик облучения земной поверхности с 9999 г. до н. э. по 9998 г. н. э. // Вычислительные технологии, 2026. Т. 31. № 1. С. 23–38. DOI: 10.25743/ICT.2026.31.1.003
21. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth`s orbital parameters and climate change // Geophysical research letters, 2002. V. 29. № 18. P. 40-1–40-3. DOI: 10.1029/2002GL015622.

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

22. Borisenkov; E. P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change, 1983. № 5. P. 237–244.
23. Borisenkov E. P., Tsvetkov A,V., Eddy J.A. Combined Effects of Earth Orbit Perturbations and Solar Activity оп Terrestrial Insolation. Part 1: Sample Days and Annual Mean Values // Journal of the atmospheric sciences, 1985. V. 42. № 9. P. 933–940.
24. Bretagnon P. Theorie du movement de l`ensemble des planetes. Solution VSOP82 // Astronomy and Asrtrophysics, 1982. V. 114. P. 278–288.
25. Cionco R.G., Soon W.W-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling // Earth-Science Reviews, 2017. V. 166. P. 206–222.
26. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth`s insolation for the 3000 BC - AD 2999 / Springer Geology, 2020. V. I. P. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6_20.
27. 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.
28. Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N. JPL`s On-Line Solar System Data Service // Bulletin of the American Astronomical Society, 1996. V. 28(3). P. 1158.
29. http://ssd.jpl.nasa.gov – Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.
30. 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.
31. Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P-L. Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale // Climate dynamics, 1992. V. 7. P. 181–194.
32. Standish E. M. Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Equinox of J2000 // Astron. Astrophys., 1982. V. 114. P. 297–302.
33. Yui Q., Berger A. Correspondence of Little Ice Age with orbitally-induced Northern Hemisphere summer insolation minimum // Quarternary Science Reviews, 2026. V. 382. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109958

References

1. Anishchenko V.S., Neiman A.B., Moss F., Shimanskii-Geier L. Stochastic resonance as a noise-induced order-increasing effect *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1999. Vol. 169, No. 1, pp. 7–38. (in Russ .).
2. Anishchenko V.S., Anufrieva M.V., Vadivasova T.E. Stochastic resonance in a bistable system under the influence of a chaotic *signal Pis'ma ZhTF*, 2006. Vol. 32(20), pp. 12–17. (in Russ.).
3. Bakulin P.I., Kononovich E.V., Moroz V.I. Course in General Astronomy. Moscow: Nauka, 1983. 560 p. (in Russ.).
4. Beletskii V.V. Essays on the Motion of Cosmic Bodies. Moscow: Nauka, 1972. 360 p. (in Russ .).
5. Blekhman, I. I. Synchronization of Dynamic Systems. Moscow: Nauka, 1971. 896 p. (in Russ .).
6. Grebennikov, E. A., Ryabov, Yu. A. Resonances and Small Denominators in Celestial Mechanics. Moscow: Nauka, 1978. 128 p. (in Russ .).

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

7. Milankovitch, M. Mathematical Climatology and Astronomical Theory of Climate Oscillations. Moscow–Leningrad: GONTI, 1939. 208 p. (in Russ .).
8. Molchanov, A. M. On the Resonance Structure of the Solar System *Modern Problems of Celestial Mechanics and Astrodynamics.* Moscow: Nauka, 1973. pp. 32–42. (in Russ .).
9. Roy, A. Orbital Motion. Moscow: Mir, 1981. 544 p. (in Russ .).
10. Sidorenkov, N. S. Celestial-mechanical causes of weather and climate change. *Geophysical processes and the biosphere*, 2015. Vol. 15. No. 3. pp. 5–26. (in Russ .).
11. Fedorov, V.M. Periodic disturbances and small variations in the Earth's solar climate *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2014. Vol. 457. No. 2. pp. 222–225. DOI: 10.7868/S0869565214200213. (in Russ .).
12. Fedorov, V.M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in different time cycles. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2015. Vol. 460. No. 3. pp. 339–342. DOI: 10.7868/S0869565215030196. (in Russ .).
13. Fedorov, V.M. Theoretical Calculation of the Interannual Variability of Earth's Insolation with Daily Resolution. *Astronomical Bulletin*, 2016. Vol. 50. No. 3. pp. 233–238. DOI: 10.7868/S0320930X16030014. (in Russ .).
14. Fedorov, V.M. Evolution of the Earth's Modern Global Climate and Its Possible Causes. *Georisk*, 2020. Vol. 14. No. 4. pp. 16–29. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29 (in Russ .).
15. Fedorov, V.M. Problems of Parameterization of the Radiation Block in Physical and Mathematical Climate Models and Possibilities of Their Solution. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2023. Vol. 193. No. 9. pp. 971–988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339 (in Russ .).
16. Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the upper boundary of the atmosphere. *Space Research*, 2019. Vol. 57. No. 3. pp. 177–184. DOI:10.1134/S002342061903004X. (in Russ .).
17. Fedorov V.M., Kostin A.A., Frolov D.M. The influence of the Earth's shape on the characteristics of the Earth's surface irradiation *Geophysical Processes and the Biosphere*, 2020. Vol. 19. No. 3, pp. 119–130. DOI: 10.21455/GPB2020.3-7 (in Russ .).
18. Fedorov V.M., Frolov D.M., Velasco Herrera N.M., Sun V.H.V., Sionko R.G. The Role of the Radiative Factor in Global Climatic Events of the Late Holocene. *Geophysical Processes and Biosphere*, 2021. Vol. 20. No. 3. pp. 5–19. DOI: 10.21455/GPB2021.3-1 (in Russ .).
19. Fedorov V.M., Frolov D.M. Changes in the Earth's Solar Climate in the Period from 1900 to 2100. *Solar-Terrestrial Physics*, 2025. Vol. 11. No. 2. pp. 15–21. DOI: 10.12737/szf-112202502 (in Russ .).
20. Fedorov V.M., Kostin A.A. Calculation of the characteristics of the Earth's surface irradiation from 9999 BC to 9998 AD. *Computational Technologies*, 2026. Vol. 31. No. 1. Pp. 23–38. DOI: 10.25743/ICT.2026.31.1.003. (in Russ .).
21. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth`s orbital parameters and climate change. *Geophysical research letters*, 2002. V. 29. № 18. P. 40-1–40-3. DOI: 10.1029/2002GL015622.
22. Borisenkov; E. P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future. *Climatic Change*, 1983. № 5. P. 237–244.
23. Borisenkov E. P., Tsvetkov A,V., Eddy J.A. Combined Effects of Earth Orbit Perturbations and Solar Activity оп Terrestrial Insolation. Part 1: Sample Days and Annual Mean Values *Journal of the atmospheric sciences*, 1985. V. 42. № 9. P. 933–940.

© Fedorov V.M., Shurygina A.A., Frolov D.M., 2026

24. Bretagnon P. Theorie du movement de l`ensemble des planetes. Solution VSOP82 *Astronomy and Asrtrophysics*, 1982. V. 114. P. 278–288.
25. Cionco R.G., Soon W.W-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling. *Earth-Science Reviews*, 2017. V. 166. P. 206–222.
26. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth`s insolation for the 3000 BC - AD 2999. *Springer Geology*, 2020. V. I. P. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6_20.
27. 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.
28. Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N. JPL`s On-Line Solar System Data Service *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1996. V. 28(3). P. 1158.
29. http://ssd.jpl.nasa.gov – Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics).
30. 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.
31. Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P-L. Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale *Climate dynamics*, 1992. V. 7. P. 181–194.
32. Standish E. M. Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Equinox of J2000. *Astron. Astrophys*., 1982. V. 114. P. 297–302.
33. Yui Q., Berger A. Correspondence of Little Ice Age with orbitally-induced Northern Hemisphere summer insolation minimum *Quarternary Science Reviews*, 2026. V. 382. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109958

© Фёдоров В.М., Шурыгина А.А., Фролов Д.М., 2026

УДК 621.3:621.22:620.91
DOI: 10.7868/S2658670326030145

Парусная энергетическая установка повышенной мощности с поворотной эстакадой

Чекарев Константин Владимирович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-5140-5142; e-mail: konstantintchekarev@yandex.ru

Залиханов Алим Михайлович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-2540-6045; e-mail: bulungu@yandex.ru

Аннотация. Территории возможного строительства и эксплуатации ветроэнергетических установок традиционной башенной конструкции в значительной степени ограничены из-за свойств грунтов, рельефа местности или же экономически невыгодно. В таких случаях возможно строительство других конструкций ветровых установок. Например, активно разрабатываются варианты конструкций парусных энергетических установок, позволяющих расширить область использования ветроэнергетики. В частности, предлагаются конструкции парусных энергетических установок наземного базирования, в которой проблема качества грунта снимается. Установки содержат системы жестких парусов, которые движутся циклически в заданном интервале перемещений перпендикулярно ветровому потоку. Чтобы увеличит эффективность установок при изменении направления движения систем жестких парусов, в них введены пружинные устройства и устройства автоматического изменения углового положения парусов, установленные на регуляторах перемещений систем жестких парусов, определяющих интервал их перемещений. Для устранения зависимости работы энергетической установки от направления ветра была разработана конструкция парусной установки с поворотной эстакадой, по которой перемещаются две связанные системы жестких парусов. При любом направлении ветра эстакада поворачивается перпендикулярно направлению ветра. Предлагаемая конструкция позволяет увеличить мощность парусной энергетической установки с поворотной эстакадой. Был создан макет этойустановки и проведены лабораторные исследования с целью определения работоспособности предложенной конструкции энергетической установки. Результаты исследований представлены в данной статье.

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

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Госзадания НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова «Ресурсы, география и эколого-экономическая эффективность возобновляемой энергетики в условиях энергетического перехода» (№ 126040819887-7).

Для цитирования: Чекарев К.В., Залиханов А.М. Подвесная энергетическая установка с ветроколесом с поворотными жёсткими парусами // Окружающая среда и энерговедение. 2026. №3. с. 219–235. DOI: 10.7868/S2658670326030145

Дата поступления в редакцию: 25.08.2026.
Дата принятия к публикации: 25.09.2026.

UDC621.3:621.22:620.91
DOI: 10.7868/S2658670326030145

Highpower sailing power plant with a rotating overpass

Konstantin V. Chekarev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-5140-5142; e-mail: konstantintchekarev@yandex.ru

Alim M. Zalikhanov
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-2540-6045; e-mail: bulungu@yandex.ru

Abstract. The areas suitable for the construction and operation of wind power plants with traditional tower designs are largely limited due to soil properties, terrain, or are economically unviable. In such cases, it is possible to build other types of wind power plant designs. For example, designs for sail-based power plants are being actively developed to expand the range of applications for wind energy. In particular, designs for ground-based sail power plants are proposed, which eliminate the issue of soil quality. The plants contain systems of rigid sails that move cyclically within a specified range of movements, perpendicular to the wind flow**.** To increase the efficiency of the systems when the direction of movement of rigid sail systems changes, spring devices and devices for automatically changing the angular position of the sails have been introduced. These devices are installed on the regulators of the movements of the rigid sail systems, which determine the range of their movements. To eliminate the dependence of the power plant's operation on the wind direction, a design of a sailing rig with a rotating overpass has been developed, along which two interconnected systems of rigid sails move. Regardless of the wind direction, the overpass rotates perpendicular to the wind direction. The proposed design makes it possible to increase the power output of a sail-based power plant with a rotating overpass. A prototype of this plant was created, and laboratory studies were conducted to determine the operability of the proposed power plant design. The research results are presented in this article.

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

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

Acknowledgments. This work was completed within the framework of the Moscow State University Research Laboratory of Renewable Energy's (RES) research project «Resources, Geography, and Ecological and Economic Efficiency of Renewable Energy in the Context of Energy Transition».

For citation: Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. (2026). Outboard power plant with a windwheel with pivoting rigid sails. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, *3*, 219–235. doi: 10.7868/S2658670326030145 (in Russ.).

Received: 25.08.2026.
Accepted: 25.09.2026.

Введение

Кинетическая энергии ветра в хозяйственной деятельности человека использовалась несколько тысячелетий. При этом, преобразователи энергии ветра в виде ветроколеса использовались только на суше, а преобразователи ветровой энергии в виде паруса использовались в основном на воде для перемещения транспортных средств. Были попытки использования парусов для перемещения транспортных средств на суше, но это направление развития не получило. В настоящее время перемещение объектов по земле с помощью парусов осуществляется только в спортивных целях.

Относительно недавно, с конца 19 века, установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали использоваться для производства электроэнергии. Они могут располагаться на суше, вблизи морского берега и на море. В большинстве действующих ветровых установках преобразование энергии ветрового потока в электроэнергию осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на высокой вертикальной опоре. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующий грунт, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки. Однако существует много территорий с высоким ветровым потенциалом, где из-за свойств грунтов или рельефа местности, сооружать такие установки либо нельзя, либо экономически нецелесообразно. Парусные энергетические установки дают возможность расширить область использования энергии ветрового потока для производства электроэнергии на эти районы.

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

1. Актуальность исследования и постановка цели

Предлагаются варианты парусных энергетических установок наземного базирования, позволяющих снять проблему качества грунта при их сооружении. Известен вариант конструкции парусной энергетической установки, содержащей платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по радиальному рельсовому пути [1]. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электроэнергия вырабатывается с помощью электрогенераторов, соединенных сколесами платформ. Недостатком предлагаемой конструкции является низкая эффективность преобразовании энергии ветрового потока, поскольку на половине пути платформы перемещаются под острым углом к направлению ветра.

Эффективность парусной энергетической установки наземного базирования можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ. Предложен вариант парусной энергетической установки, в которой платформы движутся циклично в заданном интервале перемещений перпендикулярно направлению ветра [2]. Изменение направления движения в конце интервала перемещений в такой установке осуществлялось в результате изменения положения парусов.Для проверки работоспособности предложенной конструкции была создана экспериментальная установка, на которой были проведены исследования с макетами парусных платформ. При проведении экспериментов осуществлялась проверка функционирования входящих в установку систем и разработка методик определения технических характеристик ветроэнергетической установки. Были проведены эксперименты по определению величины сил, действующих на платформы [3], определению коэффициента эффективности использования энергии ветрового потока [4], а также эксперименты по увеличению мощности ветроэнергетической установки наземного базирования [5].

При циклическом движении платформ изменение направления их движения осуществляется за счет сил, действующих на паруса платформ, при этом происходит потеря мощности установки, поскольку платформы должны остановиться, а затем вновь набрать скорость в обратном направлении. Для уменьшения потерь мощности при изменении направления движения платформ было разработано устройство, позволившее уменьшить временной интервал изменения скорости платформ при изменении направления их движения. В его состав входят пружины, расположенные на опорах, задающих интервал перемещений платформ [6]. В этом случае остановка платформ происходит за счет сил сжатия пружин, при этом кинетическаяэнергия платформы переходит в потенциальную энергию сжатой пружины.

При изменении направления движения платформ с помощью пружинных устройств возникает проблема уменьшения массы платформ для уменьшения их кинетической энергии. Это необходимо для того, чтобы снизить нагрузку на

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

пружинные устройства. Уменьшение массы платформ приводит также к увеличению мощности установки, поскольку при этом увеличивается скорость движения парусных платформ. Примером такого способа увеличения скорости парусных объектов может служить спортивные парусные болиды на колесах. На одном из них в 2022 году достигнута рекордная скорость 222 км/ч [7, 8]. На болиде был установлен более эффективный, чем традиционные паруса жесткий парус, ширина которого у основания была равна 1 м, а высота 10 метров.

В процессе решения задачи уменьшения массы парусных платформ энергетической установки, на основе полученного опыта при проведении исследований на макетах парусных платформ, и с учетом технически достижений в области создания жестких парусов была сформирована идея о том, что можно создать такую систему жестких парусов, которая будет двигаться по направляющей без перемещающего её объекта в виде платформы или болида. В этом случае аэродинамическая сила, действующая на паруса, будет использоваться в основном для выработки электроэнергии. Для эффективного использования энергии ветрового потока система жестких парусов должна двигаться циклически, перпендикулярно направлению ветрового потока, при этом изменение скорости системы жестких парусов должно осуществляться с помощью пружинного устройства, а изменение углового положения жестких парусов при изменении направления их движения должно производиться автоматически без затрат электроэнергии. Был разработан вариант такой установки для тех мест, где ветровой поток всегда направлен в одну сторону [6]. Такими свойствами обладает ветровой поток в горных ущельях [9]. Кроме того, сооружению подобных энергетических установок в горных ущельях способствует тот факт, что горные склоны могут служить опорой для крепления направляющей, по которой перемещается система жестких парусов. Предложенная энергетическая установка содержит систему жестких парусов, которая может перемещаться по подвешенной на тросе горизонтальной направляющей, на которой расположены регуляторы её перемещений, включающие пружинное устройство и устройство автоматического изменения углового положения системы жестких парусов. Трос закреплен на стенках ущелья. Система жестких парусов выполнена в виде рамы, которая на колесиках перемещается по направляющей. В раму вставлены жесткие пластины, закрепленные в ней так, что они могут поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через середину пластин.

Эксперименты, проведенные на лабораторном макете подвесной парусной установки, показали работоспособность предложенной конструкции и возможность её реализации. Недостатком подвесной парусной энергетической установки является узкая область её применения, поскольку она может эффективно работать только при ветровых потоках, не меняющих направление.

С целью расширения территории использования конструкции данной установки на районы с переменными разнонаправленными ветрами была

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

разработана конструкция парусной энергетической установки с поворотной эстакадой, по которой может перемещаться система жестких парусов [2].

Установка содержит поворотную эстакаду с мачтами, расположенными на её концах, которые могут перемещаться по кольцевому рельсовому пути на колесных опорах, с помощью электромотора, работающего по сигналам блока управления, содержащего датчик направления скорости ветра. При любом изменении направления ветра эстакада должна поворачиваться перпендикулярно направлению ветра. Для проверки работоспособности предложенной конструкции энергетической установки и её исследования был создан её макет, на котором были проведены лабораторные испытания [4, 5]. В экспериментах использовалась система жестких парусов аналогичная системе парусов подвесной парусной энергетической установки [10]. Она была выполнена в виде рамки с вставленными в неё полосками, которые могли поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через их середину. Рамка перемещалась на колесиках по направляющей, расположенной вдоль эстакады. В процессе экспериментов была найдена зависимость скорости установившихся движений системы жестких парусов от величины её свободного пробега: скорость системы жестких парусов достигает максимального значении при соотношении $L = 3l$, где L – величина интервала перемещений системы жестких парусов, который ограничивается длиной эстакады, а l – длина рамка с системой жестких парусов. Найденное соотношение накладывает ограничения на увеличение мощности парусной энергетической установки при заданной длине эстакады путем увеличения длины системы жестких парусов.

Задачей исследования было повышение мощности парусной энергетической установки при заданной длине эстакады путем введения в неё второй, связанной с первой, системы жестких парусов, движущейся параллельно по параллельному направляющему пути.

Для решения поставленной задачи была разработана конструкции парусной энергетической установки повышенной мощности с поворотной эстакадой и создан её лабораторный макет, на котором были проведены исследования по определения работоспособности предложенной конструкции и определение её параметров.

2. Экспериментальная установка, методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка содержала макет парусной энергетической установки с поворотной эстакадой с двумя направляющими путями, по которым могли перемещаться на колесиках две системы жестких парусов, и генератор ветрового потока, направление которого можно менять.

Макет парусной энергетической установки включал сегменты кругового пути радиусом 55 см, расположенного на четырех опорах на высоте 37 см. На круговом пути находилась эстакада с двумя направляющими путями. Эстакада была выполнена из четырех пластиков коробов сечением 25х16 мм, из которых

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

два были расположены вместе в середине эстакады, а два отстояли от них с двух сторон на расстоянии 80 мм. Изображение сегментов кругового пути и эстакады представлены на рис.1.

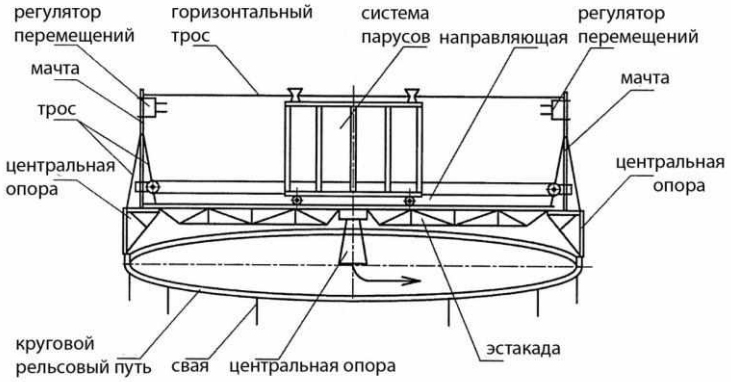


Рис.1. *Изображение схемы макета парусной энергетической установки с поворотной эстакадой.*

На концах эстакады были расположены крепежные полосы, на каждой из которых находились 2 колеса. На этих колесиках эстакада могла поворачиваться, перемещаясь по круговому пути с помощью электромотора, соединенного через шестеренки с одним из колес. На этой же крепежной полосе был расположен флюгер с контактными стойками, расположенными с двух сторон от него так, что он мог поворачиваться в угловом диапазоне +/- 3°. Электромотор был подключен через контактные полосы и флюгер к двум аккумуляторам по схеме, представленной на рис.2.

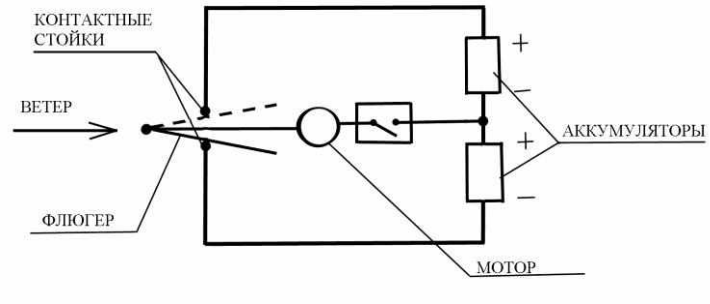


Рис.2. *Схема подключения электромотора к двум аккумуляторам через контактные стойки и флюгер.*

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

При изменении направления ветрового потока флюгер касался одной из контактных стоек и мотор начинал крутиться так, что эстакада поворачивалась так, чтобы она была расположена перпендикулярно ветровому потоку. В середине эстакады находилась центральная опора, надетая на штырь, расположенный в центре кругового пути.

Генератор ветрового потока был выполнен в виде двух рядов вытяжных вентиляторов в количестве 13 и 12 штук в нижнем и верхнем ряду соответственно. Изображение генератора ветрового потока представлено на Рис.3.



Рис.3. *Изображение генератора ветрового потока.*

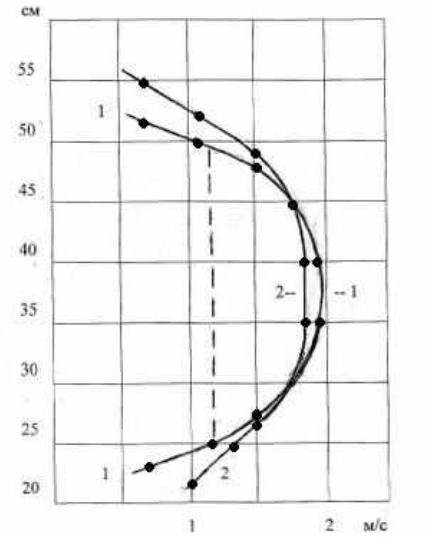


Рис.4. *График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях на расстоянии 50 и 70 см от генератора ветрового потока (графики на рисунке: 1- 50 см, 2 – 70см.; пунктирная линия – положение пластин системы жестких парусов).*

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

Вентиляторы были расположенных рядом друг с другом на рейках длиной 2 метра, разнесённых по вертикали на 8 см. Рейки крепились на трех стойках, высота которых была такой, чтобы паруса оказывались в области равномерного распределения скоростей в вертикальной плоскости. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от ГВР на расстоянии 50 см и 70 см, представлен на Рис. 4.

Нижние концы стоек генератора ветрового потока крепились к небольшим площадкам, соединенных рейкой, к середине которой под прямым углом крепилась поворотная штанга длиной 50 см, на конец которой был надет на штырь, расположенный в центре кругового пути, по которому перемещались концы эстакады эстакада. Конструкция генератора ветрового потока позволяла менять направление ветрового потока в пределах +/- 25°, оставляя неизменными расстоянии от генератора ветрового потока до направляющих путей, по которым двигались системы жестких парусов.

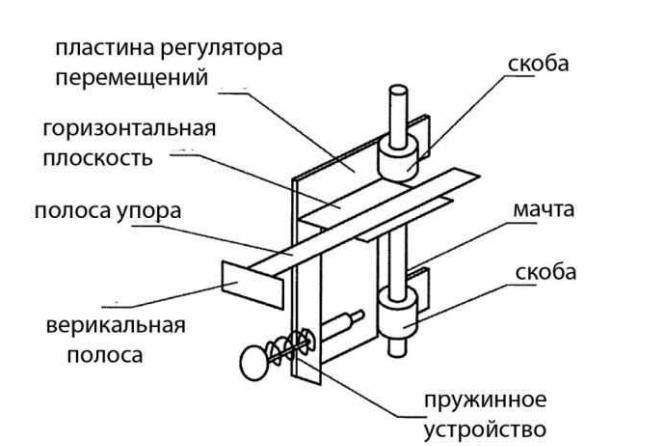


Рис.5. *Изображение регуляторов перемещений систем жестких парусов и их расположение на крепежной пластине.*

Система жестких парусов была выполнена в виде прямоугольной рамки размером 26х37 см. В рамку, сделанную из пластикового уголка размером 8х8 мм, были вставлены жесткие паруса в виде 6 пластин размером 7,5х25,5 см, вырезанных из листа пенополистирола толщиной 3 мм. Пластины могли поворачиваться на фиксированный угол +/- 45° вокруг вертикальной оси, проходящей через их середину. К верхнему углу каждой пластины с одной стороны были прикреплены вертикальные штырьки, на которые была надета горизонтальная рейка, с помощью которой осуществляется поворот пластин на фиксированный угол +/- 45°. Рамки с жесткими парусами перемещались по

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

направляющим путям на четырех колесиках, закрепленных с двух сторон на середине вертикальных сторонах рамки. Такое расположение колесиков обеспечивает устойчивость системы жестких парусов при воздействии на неё ветрового потока. Рамки движутся по эстакаде циклически в интервале перемещений L = 89 см, который задается с помощью регуляторов перемещений системы жестких парусов, расположенных на крепежных полосах на концах эстакады. В состав каждого регулятора перемещений систем жестких парусов входило пружинное устройство и устройство изменения углового положения пластин. Изображение регуляторов перемещений систем жестких парусов и их расположение на крепежной полосе показано на Рис.5.

Пружинное устройство изменяло величину скорости рамок при контакте с передней вертикальной стороной рамки. Устройство автоматического изменения углового положения системы жестких парусов содержало упорную пластину, при контакте которой с горизонтальной рейкой, расположенной на верхних концах пластин, происходил автоматический поворот пластин на фиксированный угол.

В экспериментах с движением двух рамок по параллельным направляющим путям рамки были соединены с двух сторон нитями, проходящими через блоки с вертикальной осью вращения, закрепленными на регуляторах перемещения систем жестких парусов, как это показано на Рис.6 А) и Б).

Длина нити подбиралась такой, чтобы обе рамки, находящиеся на разных концах эстакады, касались соответствующих пружинных устройств, установленных на регуляторах перемещений.

При проведении экспериментов движение платформ производилась видео фиксация на цифровую камеру. По полученным записям строились графики перемещения платформ в зависимости от времени, по которым определялась их скорость и другие параметры движения платформ.

3. Результаты экспериментов и обсуждение

Были проведены две серии экспериментов, в которых исследовалось функционирование разработанной конструкции парусной энергетической установки повышенной мощности с подвижной эстакадой на лабораторном макете.

Целью первой серии экспериментов была проверка возможности работы конструкции установки с двумя системами жестких парусов, движущимися по параллельным направляющим путям, и соединенные так, как было указано выше. Для определения эффективности работы установки с двумя связанными рамками были проведены эксперименты с движением каждой из двух рамок по направляющим путям, отстоящим от генератора ветрового потока на расстоянии 47 см и 58 см.

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

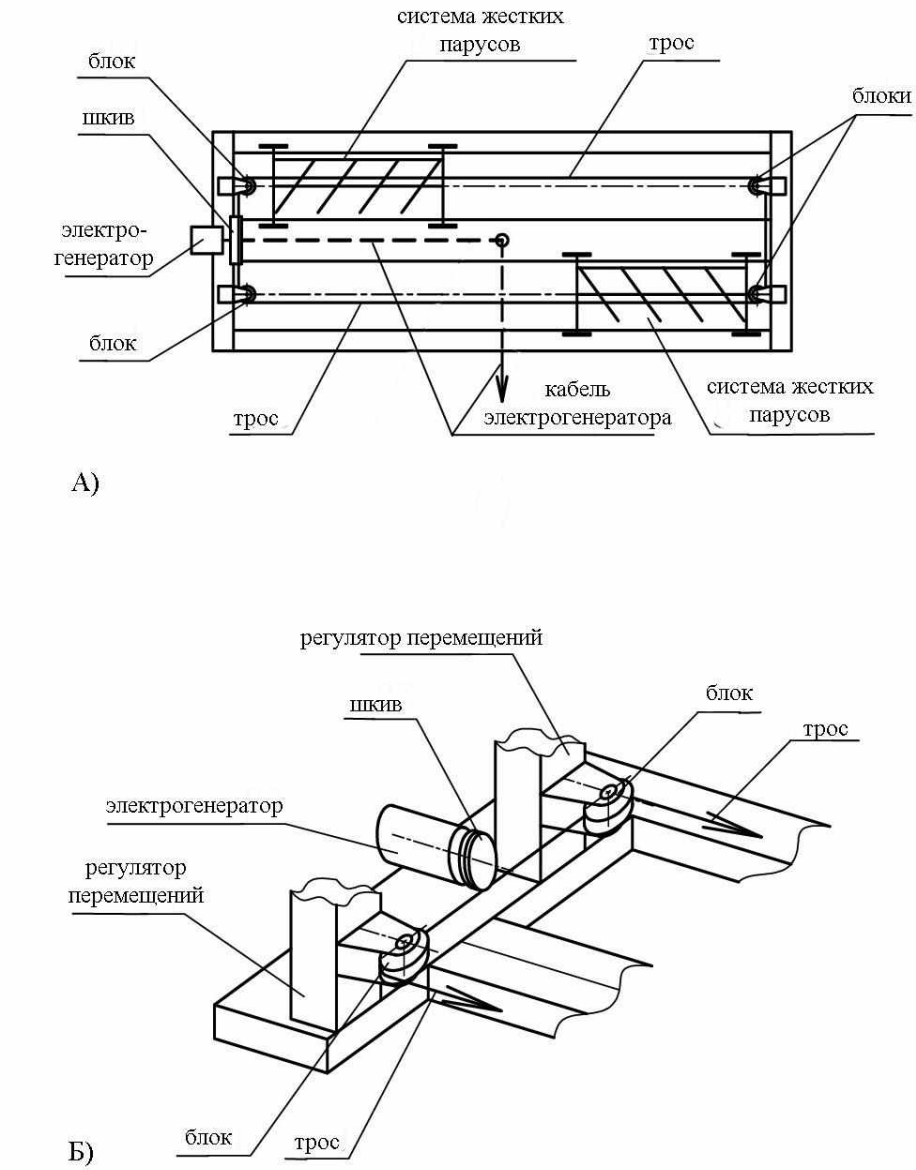


Рис. 6 А) и Б). *Изображение схемы закрепленных на регуляторах перемещений блоков, через которые проходят нити, соединяющие рамки. (А) – общий вид сверху, Б) – фрагмент левой части установки с электрогенератором, тросом и блоками).*

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

В табл. 1 приведены значения скоростей рамок с системами жестких парусов при их движении по эстакаде.

Таблица 1. *Величина скорости движения рамок 1 и 2 систем жестких парусов при их движении на интервале 52 см по направляющим путям, отстоящим от генератора.*

Рамки	**Расстояние от ГВП , см**	**Скорость Рамки V , см/с**
Рамка 1	47	44
	58	32
Рамка 2	47	49
	58	41

Генератор ветрового потока дает расходящийся ветровой поток, который действует с меньшей силой на систему жестких парусов, отстоящую дальше от генератора ветрового поток, что приводит к уменьшению скорости систем жестких парусов. Как видно из таблицы 1, скорости движения рамок по направляющей, отстоящей от ГВП на расстоянии 58 см, меньше скоростей рамок при их движении по направляющей, отстоящей от ГВП на расстоянии 47 см, при этом скорость рамки 2 по направляющей, отстоящей от ГВП на расстоянии 58 см, оказалась практически равной скорости рамки 1, отстоящей на расстоянии 47 см. Для того чтобы исключить влияние одной рамки на другую, в эксперименте с движением двух связанных рамок они двигались по указанным выше направляющим путям.

Эксперименты с движением двух связанных рамок показали, что предложенная конструкция парусной энергетической установки повышенной мощности с поворотной эстакадой работает нормально, изменение направления движения рамок и изменения положения пластин обоих рамок происходит одновременно. На рис.7 приведен график перемещений двух связанных систем жестких парусов по параллельным направляющим путям эстакады.

Скорость двух рамок систем жестких парусов соединенных замкнутой нитью, проходящей через блоки, закрепленные на регуляторах перемещений рамок, составляет V = 38,7 см/с. Движение двух соединенных нитью рамок с системами жестких парусов исследовалось в экспериментах с подвесной парусной энергетической установкой. Было установлено, что величина максимальной скорости установившихся движений связанных рамок также зависит от величины свободного пробега как и одна рамка. Перемещение связанных через блоки рамок в противоположных направлениях, ничем не отличаются от перемещения рамок, движущихся в одну сторону, постольку они движутся в одном и том же ветровом потоке. Следовательно, скорость движения связанных рамок должна была бы быть такой же, как и скорость раздельных рамок. Наблюдаемое в эксперименте уменьшение скорости двух связанных

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

рамок можно объяснить силой трения четырех блоков, через которые проходит нить, соединяющая рамки.

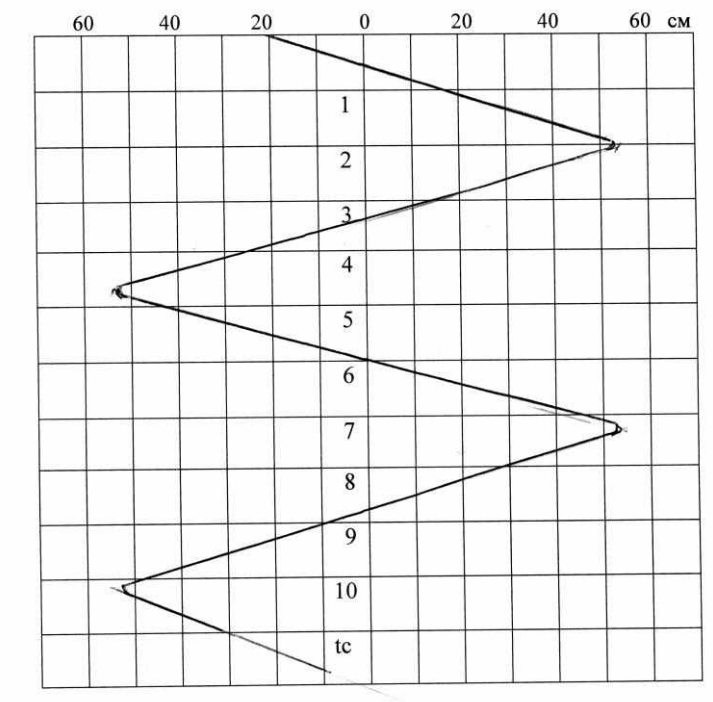


Рис 7. *График перемещений двух связанных систем жестких прусов по параллельным направляющим путям эстакады.*

Целью второй серии экспериментов была проверка возможности эстакады поворачиваться перпендикулярно направлению ветра при любом его изменении, а также определение при этом величины скорости движения связанных рамок с системами жестких парусов. Изменение направления ветра имитировалось поворотом генератора ветрового потока в интервале +/- 15° со скоростью 1,8-0,8 градусов в секунду. Экспериментальные исследования показали, что эстакада четко отслеживает изменения направлении ветра, устанавливаясь перпендикулярно направлению ветра с точностью определения направления ветра флюгером, составляющую +/- 3°. Скорость движения связанных рамок с системами жестких парусов при поворотах эстакады составляла $V = 38{,}5$ см/с, т.е. такая же, как и при постоянном направлении ветра и неподвижной эстакадой.

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

Мощность силы F ветрового потока, действующей на систему жестких парусов каждой из двух связанных рамок можно установить, определив работу, совершаемую каждой рамкой на одном интервале перемещений. Работа A силы ветрового потока, действующей на рамку 1, перемещающуюся по наветренному направляющему пути легко определить:

$$A = F(L - l) \quad (1)$$

Где: L– интервал перемещений рамок, а l – длина рамки

Для определения величины работы, совершаемой силой ветрового потока, действующей на рамку 2, движущуюся с подветренной стороны, нужно перемещение рамки разбить на несколько отрезков, на которых на рамку действуют разные силы, как это представлено на рис 8.

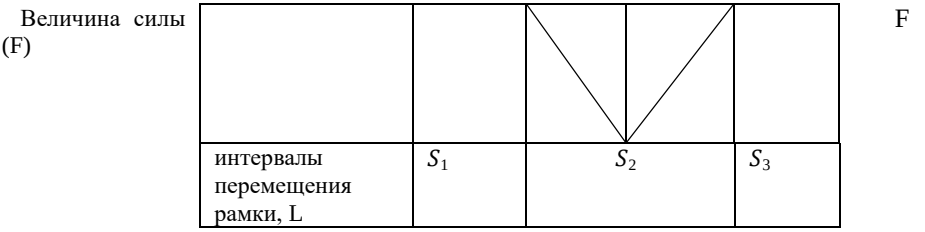


Рис. 8. *График величины силы ветрового потока F, действующей на рамку 2 при её перемещении на интервале L.*

На отрезках S_1 и S_2 на парусную систему рамки 2 действует такая же сила воздушного потока F, как и на парусную систему рамки 1. На отрезке S_2 рамка 1 перекрывает ветровой поток, поступающий на парусную систему рамки 2, но это перекрытие происходит не сразу. Величину силы ветрового потока, действующей на рамку 2 можно аппроксимировать так, как показано на графике Рис.8.

Работа сил воздушного потока A_2, действующей на рамку 2 на отрезках S_1, S_2, S_3 определяется выражениями:

На отрезке S_1 $A_1 = F(L/2 - l)$ (2)

на отрезке S_2 $A_2 = Fl/2$ (3)

на отрезке S_3 $A_3 = F(L/2 - l)$ (4)

Суммарная работа сил воздушного потока $A_2 = A_1 + A_2 + A_3$ определяется выражением

$$A_2 = F(L - l) - F\,l/2 \quad (5)$$

Мощность силы P_2, развиваемая силой, действующей на парусную систему рамки 2 на участке свободного пробега, определяется выражением $P_2 = A_2/t$, где $t = L - l/V$

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

$$P_2 = FV - FVl/2(L - l) = FV\{1 - l/2(L - l)\} \quad (6)$$

Суммарная мощность, развиваемая силой, действующей на две связанные рамки, равна $P_c = P_1 + P_2$

$$P_c = FV + FV\{1 - l/2(L - l)\} \quad (7)$$

Выражение 7 можно переписать в виде:

$$P_c = FV\ 2\{1 - 1/4(L/l - 1)\} \quad (8)$$

Выражение (8) определяет мощность, развиваемую силой, действующей со стороны воздушного потока на две связанные рамки, где коэффициент увеличения мощности k определяется выражением

$$k = 2\{1 - 1/4(L/l - 1)\} \quad (9)$$

В эксперименте интервал перемещений рамок составлял L = 89 см, а длина рамки l =37 см, отсюда $L/l = 2,4$, соответственно, коэффициент увеличения мощности получается равным $k = 1{,}64$.

При соотношении $L/l = 3$ коэффициент увеличения мощности равен $k = 1{,}75$.

При соотношении $L/l = 4$ коэффициент увеличения мощности равен $k = 1{,}84$.

Заключение

Была разработана конструкция парусной энергетической установки повышенной мощности с поворотной эстакадой и двумя связанными системами жестких парусов, движущихся по параллельным направляющим путям.

Был создан лабораторный макет предложенной конструкции парусной энергетической установки, на котором были проведены лабораторные исследования по проверке работоспособности предложенной конструкции и определению её параметров.

Исследования показали, что связанные системы жестких парусов движутся по параллельным направляющим путям практически с такой же скорость, как и одна система жестких парсов. При изменении направления ветрового потока эстакада поворачивалась перпендикулярно ветровому потоку и устанавливалась с точностью, определяемой точностью датчика направления ветра, при этом системы жестких парусов двигались с такой же скорость, как и при неподвижной эстакаде.

Была показана возможность повышения мощности парусной энергетической установки при заданной длине эстакады путем организации движения двух связанных систем жестких парусов по параллельным направляющим путям, определена формула коэффициента увеличения мощности парусной энергетической установки с двумя связанными парусными системами.

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

Литература

1. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
2. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования // Окружающая среда и энерговедение. // № 2 (14), 2022. С.77-90. http://jeees/ru//category/journal/2022-2/
3. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энерговедение. № 3 (15), 2022, сс. 67-79.
4. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: увеличение мощности // Окружающая среда и энерговедение: № 4 (16), 2022, сс. 59-70. http://jeees.ru/category/journal/2023-4/
5. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформу. // Окружающая среда и энерговедение // № 2 (18), 2023, сс. 49-61. // http://jeees.ru/category/journal/2023-2/
6. Патент № 2806704 РФ, СПК F 03 D 5/04 / Парусная ветроэнергетическая установка; № 2023113130, заявл. 2023.22.05 / Чекарев К.В., Залиханов А.М., Чекарев А.П. - заявители и правообладатели.
7. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting. URL: https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf (дата обращения 01.04.2026).
8. Видео: самая быстрая в мире машина с парусом. Болид Horonuku разогнался до 222,4 километра в час. URL: hhtp://motor/ru/news/horonuku-12-122022.htm (датаобращения 01.04.2026).
9. Барри Роджер Г. Погода и климат в горах. Л., Гидрометеоиздат, 1984. сс. 143-149.
10. Патент № 2835550 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Парусная энергетическая установка с эстакадой и мачтами; № 2024126244, заявл. 2023.06.09 / Чекарев К.В., Залиханов А.М., Дегтярев К.С., Березкин М.Ю. - заявители и правообладатели.

References

1. Tsybulnikov, S. I. Wind power plant. Russian Patent RU 2125182, IPC F03D 5/04, application No. 96123627/06, filed December 16, 1996. (in Russ.).
2. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M. (2022). Land-based sailing power plant. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 2(14), 77–90. (in Russ.).
3. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M. (2022). Land-based sailing power plant: determination of the magnitude of the forces acting on the platform. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 3(15), 67–79. (in Russ.).
4. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M. (2022). Land-based sailing power plant: increasing power. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 4(16), 59–70. (in Russ.).
5. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M. (2023). Land-based sailing power plant: a method for direct measurement of forces acting on the platform. *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, 2(18), 49–61. (in Russ.).

© Чекарев К.В., Залиханов А.М., 2026

6. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M., Chekarev, A. P. (inventors and assignees). Sailing Wind Power Plant [Patent No. 2806704, Russian Federation, IPC F 03 D 5/04]. Application No. 2023113130; filed 22 May 2023.
7. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting. URL: https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf (access 01.04.2026).
8. Video: the fastest sail car in the world. The Horonuku car accelerated to 222.4 kilometers per hour. URL: hhtp://motor/ru/news/horonuku-12-122022.htm (access 01.04.2026). (in Russ.).
9. Barry, R. G. (1984). Mountain weather and climate (A. Kh. Khrgian, Trans.). Leningrad: Gidrometeizdat [pp. 143–149].
10. Chekarev, K. V., Zalikhanov, A. M.,Degtyarev K.S., Berezkin M.Yu. (inventors and assignees). / Sail power plant with a trestle with masts / [Patent No. 2806704, Russian Federation, MPC F 03 D 5/04]. Application No. 2024126249; filed 06 September 2024.

© Chekarev K.V., Zalikhanov A.M., 2026

Окружающая среда и энерговедение

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой журнал

2026 3(31)

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

Официальный сайт журнала: http://jeees.ru

Редактор: К.С. Дегтярев. Корректор: К.Г. Горошкин.
Верстка: М.Ю. Березкин. Перевод: К.С. Дегтярев

Подписано к печати 05.11.2026. Дата выхода в свет 19.11.2026.
Формат 70×108/16. Уч.-изд. л. 10,0.

Цена свободная.

Учредитель и издатель:
ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер, д. 6, стр. 1
тел.: +7(495)276-77-35, e-mail: info@naukaran.ru

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

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

16+