

© П.И. Севостьянов, В.Е. Шунков, А.Р. Макаев

Научная статья

УДК 339.977:327.8

DOI: <http://doi.org/10.15350/2409-7616.2023.4.13>**ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

П.И. Севостьянов, В.Е. Шунков, А.Р. Макаев

Севостьянов Павел Игоревич,

кандидат политических наук, доцент кафедры политического анализа и социально-психологических процессов, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова; действительный государственный советник РФ, Москва, Россия.
Sevostyanov.PI@rea.ru

Шунков Валентин Евгеньевич,

научный сотрудник, Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН), Москва, Россия.
shunkovjr@niisi.msk.ru

Макаев Артем Радикович,

ведущий специалист кафедры политического анализа и социально-психологических процессов, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.
Makaev.AR@rea.ru

Аннотация. В статье анализируется применение спутниковых технологий – современных инновационных средств технологического контроля выбросов парниковых газов в атмосферу. Для достижения показателей, предусмотренных Парижским соглашением 2015 года, необходимо создание эффективных систем контроля выбросов в национальном и глобальном масштабе. Одним из приоритетных способов контроля выбросов парниковых газов в окружающую среду являются спутниковые технологии. Использование спутников предоставляет расширенные возможности для мониторинга выбросов парниковых газов, снижая риски неконтролируемых выбросов – последствий чрезвычайных ситуаций, а также оперативной ликвидации возможных утечек и контроля выбросов в соответствии с международными соглашениями о декарбонизации. Кроме того, система учета выбросов углекислого газа и система наблюдения за выбросами углерода представляет собой мощный политический инструмент, который позволит правительствам регулировать темпы декарбонизации не только в собственных странах. Авторы считают, что спутники дистанционного зондирования Земли фактически являются единственным объективным

средством контроля выбросов парниковых газов, позволяющим независимо и глобально отслеживать объемы и источники выбросов, поэтому при введении квот на основе международных соглашений развитым странам будет выгодно иметь группировки спутников для объективного отслеживания концентрационных шлейфов, которые генерируются точками выбросов.

Ключевые слова: *нулевые выбросы, спутниковые технологии, декарбонизация, технологический контроль, парниковые газы, зеленая экономика, энергетический переход.*

Библиографическая ссылка: *Севостьянов П.И., Шунков В.Е., Макаев А.Р. Оценка выбросов парниковых газов с помощью спутниковых систем: возможности и перспективы // ЦИТИСЭ. 2023. № 4. С. 136-146. DOI: <http://doi.org/10.15350/2409-7616.2023.4.13>*

Research Full Article

UDC 339.977:327.8

ASSESSMENT OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS USING SATELLITE SYSTEMS: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

P.I. Sevostyanov, V.E. Shunkov, A.R. Makaev

Pavel I. Sevostyanov,

Candidate of Political Sciences, Associate Professor of the Department of Political Analysis and Socio-Psychological Processes, Plekhanov Russian Economic University; Full State Councilor of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

Sevostyanov.PI@rea.ru

Valentin E. Shunkov,

Researcher, Research Institute of Systems Research of the Russian Academy of Sciences (NIISI RAS), Moscow, Russian Federation.

shunkovjr@niisi.msk.ru

Artem R. Makaev,

Leading specialist of the Department of Political Analysis and Socio-Psychological Processes, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation.

Makaev.AR@rea.ru

Abstract. *The article analyzes the use of satellite technologies – modern innovative means of technological control of greenhouse gas emissions into the atmosphere. In order to achieve the indicators stipulated by the 2015 Paris Agreement, it is necessary to create effective emission control systems on a national and global scale. Satellite technologies are one of the priority ways to control greenhouse gas emissions into the environment. The use of satellites provides enhanced opportunities for monitoring greenhouse gas emissions, reducing the risks of uncontrolled emissions – the consequences of emergencies, as well as the prompt elimination of possible leaks and emission control in accordance with international decarbonization agreements. In addition, the carbon dioxide emissions accounting system and the carbon emissions monitoring system are a powerful policy tool that will allow Governments to regulate the rate of decarbonization not only in their own countries. The authors believe that Earth remote sensing satellites are in fact the only objective means of controlling greenhouse gas emissions that allows independently and globally tracking the volumes and sources of emissions, therefore, when introducing quotas based on international agreements, it will be advantageous for developed countries to have satellite groupings for objective tracking of concentration plumes generated by emission points.*

Keywords: *zero emissions, satellite technologies, decarbonization, technological control, greenhouse gases, green economy, energy transition.*

For citation: *Sevostyanov P.I., Shunkov V.E., Makaev A.R. Assessment of greenhouse gas emissions using satellite systems: opportunities and prospects. CITISE, 2023, no. 4, pp. 136-146. DOI: <http://doi.org/10.15350/2409-7616.2023.4.13>*

Введение.

В настоящее время многие страны отстают от графика выполнения климатических целей, предусмотренных Парижским соглашением в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата¹. В Докладе ООН о разрыве в уровнях выбросов за 2022 год отмечается, что «достигнут весьма ограниченный прогресс в сокращении к 2030 году огромного разрыва в уровне выбросов, то есть разрыва между обещанным сокращением выбросов и сокращением выбросов, необходимым для достижения температурной цели, предусмотренной Парижским соглашением»². По итогам 2022 года выбросы парниковых газов в энергетике достигли нового исторического максимума – 12,43 млн. тонн эквивалента CO₂. Для того чтобы избежать климатической катастрофы, требуются не только меры по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу, но и улучшению систем технологического контроля выбросов в национальном и глобальном масштабе.

В 2019 году на западе Туркменистана спутник Claire обнаружил большой шлейф метана. Выброс произошел из газопровода на нефтегазовом месторождении «Корпеже». Более того, были обнаружены еще два шлейфа, в том числе от компрессорной станции. Эта информация позволила Туркменистану ликвидировать утечки.

Совсем скоро выявление глобальных выбросов выйдет на еще более высокий уровень благодаря спутникам, которые будут запущены консорциумом, включающим Carbon Mapper, лабораторию реактивного движения НАСА и Planet Labs Inc. Данные, собранные спутниками, будут определять и измерять источники метана и углекислого газа, а также

¹ Emissions // <https://corporate.exxonmobil.com/what-we-do/energy-supply/global-outlook/emissions> [accessed: August 18, 2023].

² Доклад о разрыве в уровне выбросов за 2022 год // https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40932/EGR2022_ESRU.pdf?sequence=12 [accessed: August 18, 2023].

более двух десятков других экологических показателей. Первые два спутника должны быть запущены уже в текущем году.

В начале 2024 года компанией Methane SAT, дочерней организацией Фонда защиты окружающей среды американской некоммерческой организации, должен быть запущен спутник весом 350 кг и стоимостью 88 млн долл³. Он будет сканировать участок земли шириной 200 км с разрешением 1 км на 1 км. По данным Methane SAT, он будет наиболее чувствительным к уровням выбросов, поскольку сможет обнаруживать концентрации метана до двух частей на миллиард. Данные, собранные спутником, будут общедоступны

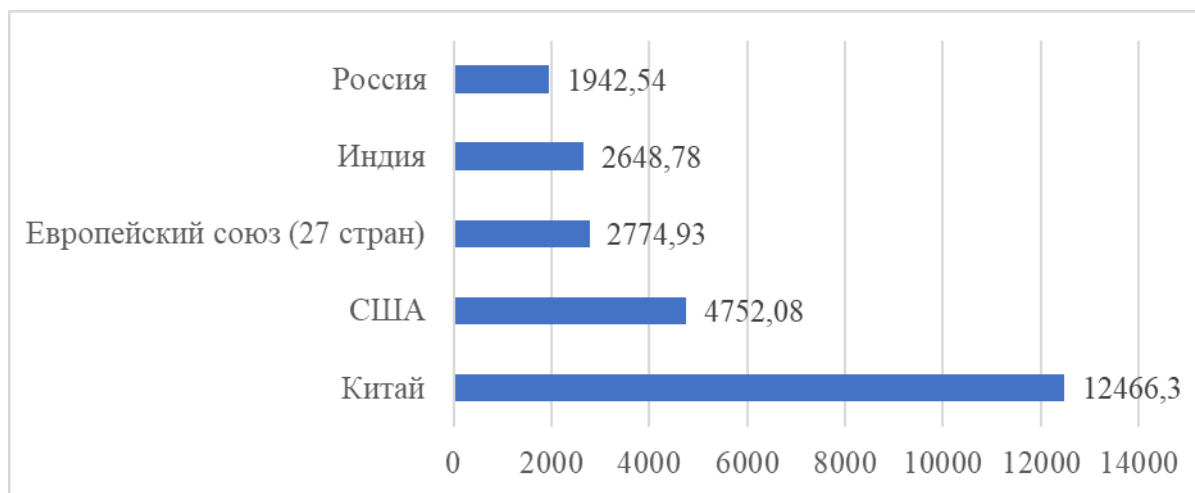


Рисунок - Крупнейшие страны по эмиссии углекислого газа (на 2021 год)⁴

Несмотря на то, что на наблюдения за парниковыми газами из космоса могут влиять облачность, осадки и время суток, возможность связывать утечки с отдельными загрязнителями становится доступнее по мере запуска большего количества спутников.

С дополнительными данными, которые предоставляют спутники, сложный углеродный цикл Земли будет намного понятнее, и это усиливает возможности технологического контроля выбросов парниковых газов в атмосферу. G. Meng, Y. Wen и ряд других исследователей отмечают: «Поскольку спутниковый мониторинг имеет характеристики крупномасштабных, непрерывных и единообразных стандартов, применение космических приборов для мониторинга концентрации парниковых газов в атмосфере и поглотителей углерода на земле может эффективно компенсировать неравномерное распределение наземных станций мониторинга» [9, Р. 32]. F. Lespinas, Y. Wang и другие подчеркивают, что «спутниковые снимки обеспечат беспрецедентный глобальный пространственный охват с высоким разрешением для долгосрочного экономически эффективного мониторинга концентрационных шлейфов CO₂, которые генерируются горячими точками выбросов. Затем выбросы могут быть оценены по величине этих шлейфов» [8, Р. 1].

Методология.

Методология исследования представлена рядом общенаучных и специфических методов. В частности, применяется ивент-анализ (событийный анализ) международной повестки в отношении масштабных выбросов парниковых газов с учетом новых перспектив технологического контроля за ними, а также формирования макроэкономических моделей, использующих спутниковые данные. Теоретической основой исследования выступили

³ Methane SAT a better and faster way to track methane // <https://www.methanesat.org/> [accessed: April 23, 2023].

⁴ Составлено авторами на основе данных EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) // https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022?vis=tot#emissions_table [accessed: August 18, 2023].

работы ряда зарубежных ученых. В частности, S. Gousset, L. Croizé, E. Le Coarer и др. изучали существующие ограничения и способы оптимизации производительности мониторинга выбросов парниковых газов с группировки малых спутников; F. Lespinas, Y. Wang, G. Broquet и др. исследовали потенциал использования спутниковых снимков на низкой околоземной орбите для мониторинга выбросов углекислого газа в отдельных районах; а L. Bruhwiler, S. Basu, J. Butler и др. затронули в своих работах более широкий вопрос возможностей и ограничений наблюдения за выбросами парниковых газов и их представления в качестве климатических индикаторов.

Результаты.

1.1. Экономические вызовы и ресурсные возможности спутников

Сегодня известно о большинстве крупных искусственных источников выбросов углекислого газа и их мощности. Но есть глобальные явления, например, лесные пожары, где вклад углекислого газа еще не полностью изучен. Например, экосистемы – бореальные леса Канады и Сибири и тропические леса Амазонки, которые являются огромными поглотителями углекислого газа, но их вклад в общую картину быстро меняется из-за повышения температуры и обезлесения. Спутниковые исследования указанных районов также актуальны и в отношении выбросов метана: например, их результаты «показывают выраженную изменчивость этого газа в районе низменностей бассейна Амазонки, где встречаются заболоченные территории. Метан имеет четко выраженное сезонное поведение с постепенным увеличением его концентрации в течение сухого сезона и последующим снижением в сезон дождей» [14, Р. 852].

Считается, что ежегодный углеродный цикл – это 330 миллиардов тонн углекислого газа⁵. Океаны поглощают примерно половину этого количества. Наземные измерения показывают, что существует большой неучтенный поверхностный «поглотитель» атмосферного углекислого газа, но его местонахождение вызывает ожесточенные споры. Причиной этого является нехватка данных о тропиках, где расположены многие из густых (и крайне труднодоступных) тропических лесов мира. Вероятно, спутники смогут восполнить пробел в наличии данных. По мнению S. Gousset, Y. Ferres и др., «во-первых, стоящая перед спутниковыми технологиями задача состоит в контроле итогового показателя атмосферы и/или её вертикальных профилей как со значительно улучшенной статистической погрешностью, так и с меньшим систематическим смещением; во-вторых, применение спутников необходимо, чтобы повысить частоту повторных посещений и расширить пространственный охват мониторинга» [7, Р. 507].

Сейчас крупнейшие по численности спутниковые группировки – это Starlink (с 2018 года запущено более 2000 спутников) и OneWeb (более 400 спутников). Это системы широкополосного вещания сети интернет, американская и европейская соответственно. На эти две спутниковые группировки приходится примерно треть всех запущенных и ныне активных спутников (по данным ООН, в 2018 году на орбите было 1800 активных спутников, а в сентябре 2021 уже 7500 шт.). Количество космических аппаратов и дальше будет продолжать расти, причем темпы ускорятся. При этом количество запусков ракет растет несущественно, но значительно растет количество спутников, выводимых за один запуск, – уже десятилетие идет тенденция к уменьшению размеров спутников. Сейчас востребованы даже спутниковые платформы формата CubeSat, самый маленький из вариантов которой предполагает кубической спутник с ребром длиной всего 10 см. В прошлом году был поставлен рекорд по одновременному запуску спутников одной ракетой-носителем – компания SpaceX вывела на орбиту сразу 143 спутника.

⁵ По данным Global Climate Highlights // <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights> [accessed: April 23, 2023].

Скорее всего, в ближайшее время ООН придется разрабатывать новые соглашения по освоению космоса – свободных орбит становится меньше, количество космического мусора растет, космические аппараты уже начинают серьезно мешать астрономическим наблюдениям, а потребность в спутниках продолжает расти с каждым годом.

Помимо важности спутников навигации и передачи данных, стоит отдельно отметить необходимость развития спутников дистанционного зондирования Земли.

1.2. Границы применения

Изначально основным применением спутников дистанционного зондирования Земли была картография, благодаря которой мы можем пользоваться сервисами «Яндекс Карты» и Google Maps. Сейчас, благодаря развитию технологий по обработке больших массивов данных и распознаванию образов при помощи искусственного интеллекта, назначение спутников дистанционного зондирования Земли существенно расширено.

Существуют различные направления прикладного использования спутниковых технологий. В частности, можно выделить прогнозирование погоды и предполагаемых климатических изменений, исследование месторождений полезных ископаемых на предмет возможности их добычи, а также оперативную оценку последствий чрезвычайных ситуаций природного и антропогенного характера для построения стратегии их ликвидации.

В рамках данных направлений исследования осуществляются с использованием оптических технологий, радио-, ультрафиолетового и инфракрасного излучения. В частности, инфракрасный и ультрафиолетовый участки электромагнитного спектра являются объективно недоступными для исследования с помощью наземных технологий.

Благодаря широкодиапазонному спектральному анализу атмосферы и поверхности Земли на основе показаний приборов удается определять состав атмосферы и горных пород, что, в свою очередь, позволяет делать прогнозы о наличии полезных ископаемых, предсказывать погоду и следить за экологической обстановкой. Причем последнее, то есть контроль экологической обстановки при помощи спутников, скоро станет очень востребованным, а наличие собственной большой группировки спутников дистанционного зондирования Земли станет для России необходимостью.

Спектроскопия основана на поглощении разными веществами определённого спектра длин волн. При пропускании излучения через вещество происходит возбуждение колебательных движений молекул или их отдельных фрагментов. При этом наблюдается ослабление интенсивности излучения, прошедшего через образец. Поглощение происходит не во всём спектре падающего излучения, а лишь при длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах.

В спутниках используются широкодиапазонные или ИК-хроматографы. Первые не являются специальными для отслеживания концентрации парниковых газов, однако позволяют дополнительно оценивать общую отражательную способность планеты, содержание различных веществ в атмосфере и состояние покровов. Для контроля же парниковых газов используют спутники с ИК-хроматографами, так как спектральные линии поглощения (абсорбционные линии) парниковых газов лежат в инфракрасной области. Линии поглощения основных парниковых газов, производимых человеком таковы: 1,58 мкм. (углекислый газ); 1,65 мкм. (метан). Линия поглощения, используемая в качестве эталонной (из-за самого сильного поглощения), составляет 0,76 мкм. (кислород).

В плане реализации спектрометров в спутниках для определения интенсивности интересующих нас длин волн используется принцип интерферометра Майкельсона (Фурье-спектрометр) или Эшеллеспектрометр («шкала решётки», являющаяся модификацией Фурье-спектрометра для одновременного исследования разных длин волн). Принцип работы – разделение света на два пучка с возможностью изменения фазы одного из пучков для создания интерференционной картины, по которой можно определить длину волны и

интенсивность света. Интерференционная картина считывается датчиками и преобразуется при помощи АЦП в цифровой сигнал, после чего происходит его дальнейшая необходимая компьютерная обработка. В рамках данного исследования учитывается, что при исследовании атмосферы планеты (а не напрямую звезды) свет от Солнца сначала проходит до поверхности Земли и потому попадает на спектрометр спутника только после повторного прохождения атмосферы. Исходя из этого, при исследовании атмосферы требуется калибровка, исключая двойное прохождение атмосферы и тип местности на поверхности планеты, от которого солнечные лучи были отражены (снег, вода, лес, горы, тундра, степь), поскольку от этого будет зависеть отражательная способность планеты.

В России разработано как минимум два специализированных спектрографа контроля парниковых газов для установки на спутники. В частности, «Русалка» – ИК-спектрометр Эшелле для определения концентрации углекислого газа, метана, водяного пара и кислорода в атмосфере (работал на МКС с августа 2009 по март 2012 года).

1.3. Механизм контроля и оценки

Парижское соглашение, принятое для предотвращения ускоренного изменения климата, не предусматривает обязательных к выполнению норм по выбросам, однако текущая европейская политика и планы по переходу на «зеленую» энергетику к 2035 году, несомненно, приведут к международным соглашениям о введении квот на выбросы парниковых газов, к которым относятся углекислый газ и метан. Спутники дистанционного зондирования Земли фактически являются единственным объективным средством контроля выбросов парниковых газов, позволяющим независимо и глобально отслеживать объемы и источники выбросов, поэтому каждой стране, которая ратифицирует будущие соглашения, будет выгодно иметь собственную глобальную группировку спутников для контроля выбросов парниковых газов. Если с углекислым газом все привычно и понятно – он образуется при сжигании топлива, то с метаном, на вклад которого в глобальное изменение климата приходится примерно 25%, сложнее. Его концентрация в атмосфере ниже по сравнению с углекислым газом, однако он примерно в 20 раз эффективнее удерживает тепло в атмосфере, поэтому его мониторинг является особенно важным. Метан – это природный газ, который образуется как в природе в процессе разложения органики, так и является продуктом жизнедеятельности человека. По сегодняшним данным, примерно половина всех выбросов метана приходится на сельское хозяйство: источник 30% метана приходится на кишечную ферментацию крупного рогатого скота, остальные 20% – на выращивание риса и других видов сельскохозяйственной деятельности. В августе 2022 года президент США Джо Байден подписал закон о снижении инфляции, который предусматривает крупнейшие в истории инвестиции федерального правительства США в климат, в том числе более 391 млрд. долл. на сокращение выбросов углерода⁶. Предполагается, что реализация данных мер позволит США выполнить свои обязательства в рамках Парижского соглашения⁷.

ООН уже предпринимает попытки по поискам альтернативного крупному рогатому скоту источника животного белка, предполагающего меньшие выбросы метана. На данный момент наиболее перспективным является введение в человеческий рацион насекомых – Европейский союз уже одобрил и признал безопасным потребление сушеных желтых мучных червей в пищу. Остальные 50% выбросов метана, по современным представлениям, происходят за счет добычи нефти, газа и угля (20%); а также образуются за счет сточных вод и свалок (30%).

⁶ Biden signs Inflation Reduction Act into law <https://edition.cnn.com/2022/08/16/politics/biden-inflation-reduction-act-signing/index.html> [accessed: April 23, 2023].

⁷ Modeling the Inflation Reduction Act using the Energy Policy Simulator https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2022/08/Modeling-the-Inflation-Reduction-Act-with-the-US-Energy-Policy-Simulator_August.pdf [accessed: April 25, 2023].

Однако инцидент с утечкой метана на газопроводе в Татарстане и его анализ показали, что реальный масштаб выбросов метана нефтегазовой промышленностью, скорее всего, превышает официальные оценки. Увеличение количества спутников дистанционного зондирования должно улучшить ситуацию. 4 июня 2021 года спутник дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства из программы Copernicus зарегистрировал утечку на газопроводе, проходящем в Татарстане. Здесь нужно отметить, что существует Международная Хартия по космосу и крупным катастрофам (англ. International Charter on Space and Major Disasters), предусматривающая в случае крупных катастроф бесплатное получение и использование снимков со спутников дистанционного зондирования Земли его участниками. Среди стран-участниц есть и Россия, предоставляющая данные с российских спутников «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Метеор-М». Владелец газопровода быстро устранил утечку, а анализ данных спутника показал высокую скорость выброса метана – 395 метрических тонн в час. Обнаружить утечку метана на газопроводе при помощи наземного оборудования можно довольно быстро, но адекватно оценить объем потери газа без использования спутника затруднительно. Такие большие утечки происходят не только из-за износа газопровода или непредвиденных ситуаций, но еще и потому, что при крупных авариях сложно откачать газ. Проще перекрыть участок и либо дать газу выйти в атмосферу, либо произвести его сжигание (что технически сложнее при аварии), чтобы уменьшить наносимый вред окружающей среде. Без использования спутников оценить реальные масштабы подобных утечек тяжело, особенно в труднодоступных районах. Тем более аварии являются не единственным источником выбросов метана нефтегазовой отрасли.

Заключение.

1. В текущих условиях разработка и запуск спутников в России затруднены из-за проблем с номенклатурой электронной компонентной базы и иностранных производственных площадок, однако при своевременных инвестициях в радиоэлектронную и космическую отрасль можно достичь необходимого уровня импортозамещения, крайне необходимого России.

2. В то время как первоначальная система учета углерода была сосредоточена на потреблении, которое приводит к выбросам, спутники предоставили способ определить именно их источник. F. Møller, D. Grinderslev и другие отмечают, что «экологические показатели – это физические показатели, связанные с физической активностью, которые не вписываются в экономические модели. Одним из способов решения данной проблемы является разработка экологических спутниковых моделей, связанных с экономическими моделями. Это даёт систему отчета, в которой выбросы парниковых газов анализируются в соответствии с макроэкономическими переменными и в соответствии с ними» [10, Р. 197].

3. Сегодня, когда выбросы двуокиси углерода в целом снижаются, система учета выбросов углекислого газа и система наблюдения за выбросами углерода представляет собой очень мощный политический инструмент, который позволит правительствам регулировать темпы декарбонизации своих экономик. Например, Китай запустил собственные спутники, заявив, что возглавляемая США система, которая обнаружила несколько источников незаконных выбросов в Китае, была политически предвзятой. Однако тотальное наблюдение за физическим миром закроет, очевидно, последнюю большую лауну для утаивания выбросов через неформальные системы.

Список источников:

1. Севостьянов П.И., Макаев А.Р. Политические условия декарбонизации в рамках энергетического перехода: международные риски и возможности для России //

Среднерусский вестник общественных наук. 2023. Т. 18, № 1. С. 72-86. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50321115>

2. Севостьянов П.И., Матюхин А.В. "Энергетический переход" в современной международной повестке // Обозреватель. 2022. № 2 (385). С. 19-31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48017462>

3. Andres R. J., Boden, T.A., Higdon, D.M. Gridded uncertainty in fossil fuel carbon dioxide emission maps, a CDIAC example // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2016. Vol. 16, No. 23. P. 14979–14995. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-2016-258>

4. Bondur V.G., Gordo, K. A., Kladov, V. L. Spacetime Distributions of Wildfire Areas and Emissions of Carbon-Containing Gases and Aerosols in Northern Eurasia according to Satellite-Monitoring Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. No. 9. P. 859–874. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35502549>

5. Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J., et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications // Atmospheric Measurement Techniques. 2010. Vol. 3. No. 4. P. 781-811. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18229022>

6. Bruhwiler L., Basu S., Butler J.H., et al. Observations of greenhouse gases as climate indicators // Climatic Change. 2021. Vol. 165. P. 12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45926065>

7. Gousset S., Croizé L., Le Coarer E., et al. NanoCarb hyperspectral sensor: on performance optimization and analysis for greenhouse gas monitoring from a constellation of small satellites // CEAS Space Journal. 2019. Vol. 11. No. 4. P. 507–524. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42256350>

8. Lespinas F., Wang Y., Broquet G., et al. The potential of a constellation of low earth orbit satellite imagers to monitor worldwide fossil fuel CO₂ emissions from large cities and point sources // Carbon Balance Manage. 2020. Vol. 15. P. 1-12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52018266>

9. Meng G., Wen Y., Zhang M., et al. The status and development proposal of carbon sources and sinks monitoring satellite system // Carb Neutrality. 2022. Vol. 1. P. 32. URL: <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00033-5>

10. Møller F., Grinderslev D., Werner M. Environmental Satellite Models for a Macroeconomic Model // Environmental and Resource Economics. 2003. Vol. 24. P. 197-212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=5000056>

11. Nassar R., Hill T., McLinden C., et al. Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. No. 10. P. 10045-10053. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL074702>

12. Nassar R., Sioris C., Jones D., et al. Satellite observations of CO₂ from a highly elliptical orbit for studies of the Arctic and boreal carbon cycle // Journal of Geophysical Research. 2014. Vol. 119. No. 5. P. 2654-2673. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020337>

13. Palacios-Orueta A., Chuvieco E., Parra A., et al. Biomass Burning Emissions: A Review of Models Using Remote-Sensing Data // Environmental Monitoring and Assessment. 2005. Vol. 104. P. 189-209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-005-1611-y>

14. Ribeiro I.O., de Souza R.A.F., Andreoli R. V., et al. Spatiotemporal variability of methane over the Amazon from satellite observations // Advances in Atmospheric Sciences. 2016. Vol. 33. P. 852-864. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52144822>

15. Salama D.S., Yousif M., Gedamy Y., et al. Satellite observations for monitoring atmospheric NO₂ in correlation with the existing pollution sources under arid environment // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. Vol. 8. No. 3. P. 4103-4121. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50867858>

References:

1. Sevostyanov, P. I., Makaev, A. R. Political conditions of decarbonization within the framework of the energy transition: international risks and opportunities for Russia. *Central Russian Bulletin of Social Sciences*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 72-86. (In Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50321115>
2. Sevostyanov, P. I., Matiukhin, A. V. "Energy transition" in the modern international agenda. *Observer*, 2022, no. 2 (385), pp. 19-31. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48017462>
3. Andres R.J., Boden T.A., Higdon D.M. Gridded uncertainty in fossil fuel carbon dioxide emission maps, a CDIAC example. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2016, vol. 16, no. 23, pp. 14979–14995. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-2016-258>
4. Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov, V.L. Spacetime Distributions of Wildfire Areas and Emissions of Carbon-Containing Gases and Aerosols in Northern Eurasia according to Satellite-Monitoring Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, no. 9, pp. 859-874. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35502549>
5. Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J., et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 781-811. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18229022>
6. Bruhwiler L., Basu S., Butler J. H., et al. Observations of greenhouse gases as climate indicators. *Climatic Change*, 2021, vol. 165, p. 12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45926065>
7. Gousset S., Croizé L., Le Coarer E., et al. NanoCarb hyperspectral sensor: on performance optimization and analysis for greenhouse gas monitoring from a constellation of small satellites. *CEAS Space Journal*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 507-524. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42256350>
8. Lespinas F., Wang, Y., Broquet G., et al. The potential of a constellation of low earth orbit satellite imagers to monitor worldwide fossil fuel CO₂ emissions from large cities and point sources. *Carbon Balance Manage*, 2020, vol. 15, pp. 1-12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52018266>
9. Meng G., Wen, Y., Zhang, M., et al. The status and development proposal of carbon sources and sinks monitoring satellite system. *Carb Neutrality*, 2022, vol. 1, p. 32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00033-5>
10. Møller F., Grinderslev D., Werner M. Environmental Satellite Models for a Macroeconomic Model. *Environmental and Resource Economics*, 2003, vol. 24, pp. 197-212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=5000056>
11. Nassar R., Hill T., McLinden C., et al. Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 10, pp. 10045-10053. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL074702>
12. Nassar R., Sioris C., Jones D., et al. Satellite observations of CO₂ from a highly elliptical orbit for studies of the Arctic and boreal carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2014, vol. 119, no. 5, pp. 2654-2673. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020337>
13. Palacios-Orueta A., Chuvieco E., Parra A., et al. Biomass Burning Emissions: A Review of Models Using Remote-Sensing Data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, vol. 104, pp. 189-209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-005-1611-y>
14. Ribeiro I.O., de Souza R.A.F., Andreoli R.V., et al. Spatiotemporal variability of methane over the Amazon from satellite observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, vol. 33, pp. 852-864. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52144822>

15. Salama D.S., Yousif M., Gedamy Y., et al. Satellite observations for monitoring atmospheric NO₂ in correlation with the existing pollution sources under arid environment. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 4103-4121. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50867858>

Submitted: 01 October 2023

Accepted: 10 November 2023

Published: 11 November 2023

