

Геоинформатика. 2024. № 4. С. 48–56.
Geoinformatika. 2024;(4):48–56.

Геоэкология

Научная статья
 УДК 502.1: 502.568: 504.1:528.854:528.88
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-48-56>

Анализ динамики некоторых средообразующих переменных в природно-техногенных геосистемах степного Приуралья на основе спутниковых данных

© 2024 г. — Ксения Викторовна Мячина^{a)}, Антон Николаевич Щавелев^{b)}, Роман Васильевич Ряхов^{c)}

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук ОФИЦ УрО РАН; Оренбург, Россия

^{a)}mavicsen@list.ru, ^{b)}ditmark12rus@gmail.com, ^{c)}remus.rv@gmail.com

Аннотация: Анализ динамики содержания основных парниковых газов в атмосфере и связанных климатических переменных на определенных территориях является одним из подходов к решению современных эколого-климатических задач. Целью исследования ставилось изучение динамики некоторых средообразующих параметров в природно-техногенной геосистеме нефтегазового месторождения в приуральской части Волго-Уральского степного региона. На территории исследования выделены две зоны: зона 1 с природно-техногенной геосистемой и зона 2 с исходным ландшафтом. Выполнен анализ изменения содержания двух главных парниковых газов — диоксида углерода и метана — в атмосфере зон 1 и 2, колебания температуры и альbedo поверхности ландшафта, содержания влаги в растительном покрове. В качестве исходных материалов использовались спутниковые снимки и продукты на их основе, находящиеся в свободном доступе: OCO-2 (2015–2021 гг.), Sentinel-5P (2018–2024 гг.), Landsat-8 (2013–2022 гг.). Обнаружено незначительное повышение средней концентрации диоксида углерода в атмосфере зоны 1 по сравнению с зоной 2, более низкое содержание метана в атмосфере зоны 1 по сравнению с зоной 2, стабильное повышение концентрации обоих парниковых газов над территорией исследования, а также изменения температурно-влажностного и радиационного балансов в техногенно-трансформированных ландшафтах зоны 1 (повышение температуры поверхности при снижении содержания влаги в растительном покрове и отражательной способности ландшафтов). Таким образом, современные спутниковые изображения позволяют выявить динамику ряда средообразующих переменных, включая парниковые газы, в зонах исследовательского интереса.

Ключевые слова: *средообразующие параметры; диоксид углерода; метан; динамика; Волго-Уральский степной регион; природно-техногенная геосистема; спутниковые данные.*

Для цитирования: Мячина К.В., Щавелев А.Н., Ряхов Р.В. Анализ динамики некоторых средообразующих переменных в природно-техногенных геосистемах степного Приуралья на основе спутниковых данных // Геоинформатика. — 2024. — № 4. — С. 48–56. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-48-56>.

Geoecology

Original article

Dynamics analysis of some environmental variables in natural and technogenic geosystems of the steppe Urals based on satellite data

© 2024 — Ksenia V. Myachina^{a)}, Anton N. Shchavelev^{b)}, Roman V. Ryakhov^{c)}

Steppe Institute of the Ural Branch of the RAS; Orenburg, Russia

^{a)}mavicsen@list.ru, ^{b)}ditmark12rus@gmail.com, ^{c)}remus.rv@gmail.com

Abstract: Analysis of the dynamics of the main greenhouse gases content in the atmosphere and related climate variables in certain territories is one of the approaches to solving modern environmental and climatic problems. The purpose of the paper is to study the dynamics of some environment-forming variables in the natural-technogenic geosystem of an oil and gas field in the Ural part of the Volga-Ural steppe region. In the study area, zone 1 with a natural-technogenic geosystem and zone 2 with the original landscape are identified. The change in the content of two main greenhouse gases — carbon dioxide and methane — in the atmosphere of zones 1 and 2, fluctuations in temperature and albedo of the landscape surface, and moisture content in vegetation were analyzed. Satellite images and freely available products were used as source materials: OCO-2 (2015–2021), Sentinel-5P (2018–2024), Landsat-8 (2013–2022). A slight increase in the average concentration of carbon dioxide in the atmosphere of zone 1 compared to zone 2, a lower content of methane in the atmosphere of zone 1 compared to zone 2, a stable increase in the concentration of both greenhouse gases over the study area, as well as changes in temperature, humidity and radiation balances in technogenic transformed landscapes of zone 1 (an increase in surface temperature with a decrease in moisture content in the vegetation cover and the reflectivity of landscapes) were discovered. Thus, recent satellite images make it possible to reveal the dynamics of a number of environmental variables, including greenhouse gases, in areas of research interest.

Key words: *environment-forming parameters; carbon dioxide; methane, dynamics; Volga-Ural steppe region; natural-technogenic geosystem; satellite data.*

For citation: Mychina K.V., Shchavalev A.N., Ryakhov R.V. Dynamics analysis of some environmental variables in natural and technogenic geosystems of the steppe Urals based on satellite data. *Geoinformatika*. 2024;(4):48–56. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-48-56>. In Russ.

Введение

Антропогенная деятельность трансформировала локальные, региональные и глобальные потоки энергии и вещества, вызвав в том числе изменения циркуляции парниковых газов в мировой экосистеме [1–3]. Считается, что диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄) входят в первую тройку парниковых газов, усиливающих эффект температурных изменений в атмосфере и влияющих на глобальные климатические процессы [4–6]. Показатели эмиссии CO₂ обусловлены такими факторами, как исходные природно-климатические условия местности и текущие варианты антропогенной нагрузки, а концентрация диоксида углерода в атмосфере может колебаться в пределах 0,02–0,045 % [7–9]. В то же время относительное содержание в атмосфере остальных парниковых газов, включая метан, не превосходит 3×10^{-4} % [10]. Однако известно, что 1 кг метана разогревает атмосферу эффективнее 1 кг углекислого газа в 67, 23 и 6,9 раз при расчетах на 20, 100 и 500-летний периоды вследствие того, что «время жизни» молекулы метана в атмосфере примерно в 10 раз короче «времени жизни» молекулы диоксида углерода [11]. Источники метана делятся на естественные (болота, торфяники) и антропогенные — процессы и объекты инфраструктуры сельскохозяйственной и горно-добывающей промышленности. При этом именно совокупность антропогенных источников обеспечивает минимум половину всей эмиссии метана в атмосферу.

С увеличением содержания парниковых газов в экосистеме количество поглощенной ими и, следовательно, переизлучаемой тепловой радиации в направлении земной поверхности увеличивается, что, в свою очередь, приводит к повышению температуры воздуха в приземном слое атмосферы [12, 13]. Повышение температуры приземного слоя атмосферы и уменьшение содержания влаги в растительном покрове — наиболее заметные изменения климатических переменных, выполняющих с точки зрения экосистемных услуг средообразующие функции. Соответственно, анализ динамики содержания основных парниковых газов в атмосфере и связанных климатических переменных на определенных территориях является одним из подходов к решению современных эколого-климатических задач. Полностью ограничить выбросы парниковых газов невозможно, поэтому проблемы, связанные с оценкой их содержания в атмосфере, факто-

ров его вариабельности и механизмов регуляции приобретают все большую мировую актуальность.

Российские степные ландшафты играют ключевую роль в сохранении глобального биоразнообразия и поддержании биосферной регуляции, в связи с чем крайне актуален мониторинг преобразования средообразующих параметров в части биогеофизических механизмов регуляции климата. В то же время в российских степных регионах разрабатывается более 500 нефтегазовых месторождений, что обуславливает определенную структуру техногенных преобразований исходных ландшафтов с формированием природно-техногенных геосистем нефтегазовых месторождений [14]. Целью представленной работы ставилось описание изучения динамики некоторых средообразующих климатических переменных в природно-техногенной геосистеме нефтегазового месторождения по сравнению с исходной степной геосистемой. Задача — выполнить анализ изменения содержания двух главных парниковых газов в атмосфере, колебания температуры и альбедо поверхности ландшафта, содержания влаги в растительном покрове. В настоящее время высокую значимость в проведении такого рода исследований приобрели методы, связанные с тематической обработкой оригинальных спутниковых изображений и продуктов на их основе.

Объекты и методы

Территория исследования выделена в приуральской части Волго-Уральского степного региона, в границах Оренбургской области. Оренбургское Приуралье играет ведущую роль в добыче УВ-сырья в степной зоне Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, демонстрируя кумулятивные эффекты полимасштабности воздействия нефтегазодобычи. Разработка нефтегазовых месторождений в области ведется с начала 40-х гг. XX в., что обеспечивает высокий уровень научной репрезентативности при изучении трансформации средообразующих характеристик в природно-техногенных геосистемах нефтегазовых месторождений по сравнению с исходными.

Территория исследования состоит из двух зон (зона 1, зона 2) площадью около 4,2 тыс. км² каждая. В первой зоне преобладают трансформированные недропользованием ландшафты, т. е. наличествует развитая природно-техногенная геосистема, где за единую природно-техногенную геосистему принята совокупность инфраструктуры нескольких рядом расположенных месторождений. На общую

подсчитанную площадь механической трансформации ландшафтов приходится здесь около 2,6%. Помимо непосредственных нарушений почвенно-растительного покрова, трансформирующих локальные климатические характеристики, на нефтегазопромислах ведутся технические процессы, также способствующие проявлению вышеуказанного эффекта.

В зоне 2 отмечается минимальная степень воздействия нефтегазодобывающего производства; однако наличествует сельскохозяйственная деятельность, в том числе выпас скота. Соответственно, в границах зоны 2 преобладают условия исходного ландшафта, который в основном не представляет собой естественную степь: преобладают разновозрастные залежи и пастбища, отображающие наиболее характерное ландшафтное окружение природно-техногенной геосистемы.

В качестве исходных материалов для анализа средообразующих климатических переменных использовались космические снимки и продукты, находящиеся в свободном доступе: OCO-2, Sentinel-5P, Landsat-8. Продукты уровня 2 спутника OCO-2, специально предназначенного для изучения атмосферного углекислого газа, позволили выполнить анализ динамики содержания диоксида углерода в атмосфере исследуемой территории за период с 2015 по 2021 г. [15]. С помощью снимков спутника Sentinel-5P аналогичные подсчеты выполнены для метана [16]. Наконец, тепловые каналы спутника Landsat-8 позволили выявить изменения некоторых физических характеристик ландшафта: средние за вегетационный период значения температуры поверхности, показатели альбедо, а также рассчитать спектральный индекс

показателя влаги в растительном покрове (NDMI) [17, 18] для временного среза с 2013 по 2022 г.

Результаты и обсуждение

Парниковые газы

Подсчеты концентрации диоксида углерода CO₂ выполнены за 6 лет, с 2015 по 2021 г. — лишь на этот период доступны исходные материалы спутника OCO-2. Для метана CH₄ имеется возможность расчета его концентрации с 2018 по 2024 г.

Расчетные средние значения концентраций CO₂ и CH₄ в атмосфере изучаемой территории и значения трендов в разбивке на две зоны представлены в табл. 1.

Как видно в табл. 1, средние за период исследования значения концентраций диоксида углерода над зонами 1 и 2 различаются незначительно (на 0,008 ppm). График содержания CO₂, представленный на рис. 1, демонстрирует, что ежегодно в одни и те же сезонные отрезки наблюдаются экстремумы: в августе и сентябре отмечаются годовые минимумы содержания диоксида углерода в атмосфере обеих зон, в феврале и марте — максимумы. При этом некоторая разница средних значений над зонами 1 и 2 сохраняется, как и устойчивый общий положительный тренд концентрации CO₂ в атмосфере изучаемой территории.

Картографическое отображение значений тренда содержания диоксида углерода CO₂ представлено на рис. 2 А.

Как видно в табл. 1 и на рис. 1, 2 А, за рассматриваемый период произошел общий рост среднего значения концентрации диоксида углерода в атмосфере: прирост в 18 ppm выявлен над зоной 1 и в 17 ppm — над зоной 2. Аналогично средним по-

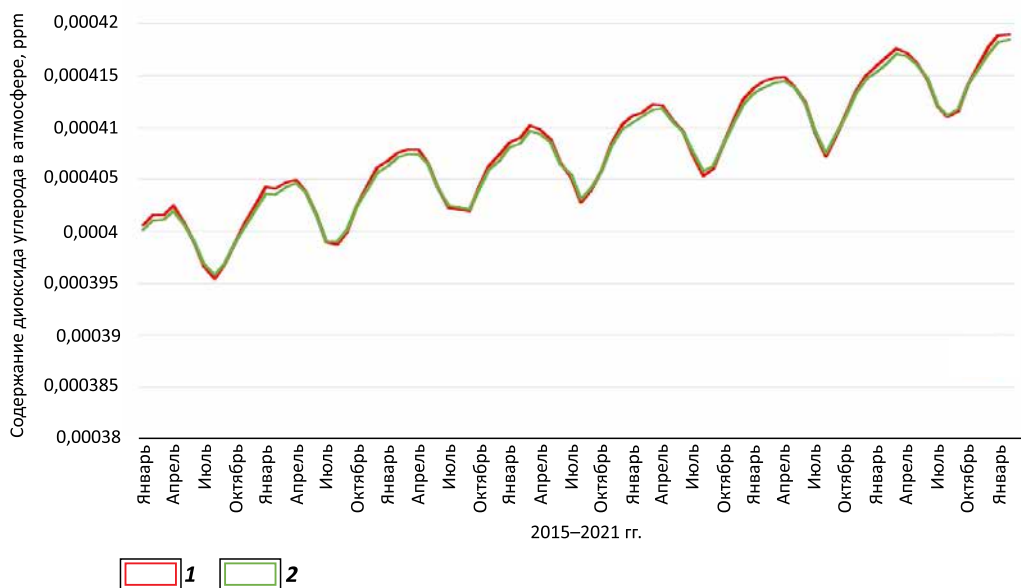
Табл. 1. Содержание парниковых газов в атмосфере территории исследования

Tab. 1. Greenhouse gas content in the atmosphere of the study area

Парниковый газ	Средняя концентрация в зоне 1 (с природно-техногенной геосистемой)	Средняя концентрация в зоне 2 (с преобладанием исходного ландшафта)	Разница значений в зоне 1 и зоне 2	Спутник — источник данных
CO ₂ средн. за период, ppm	410,272	410,264	0,008	OCO-2
CO ₂ тренд, ±ppm	+18	+17	1	
CH ₄ средн. за период, ppbv	1873,066	1875,210	-2,144	Sentinel-5P
CH ₄ тренд, ±ppbv	+75	+73	2	

Рис. 1. Динамика содержания диоксида углерода над зонами 1 и 2 с 2015 по 2021 г.

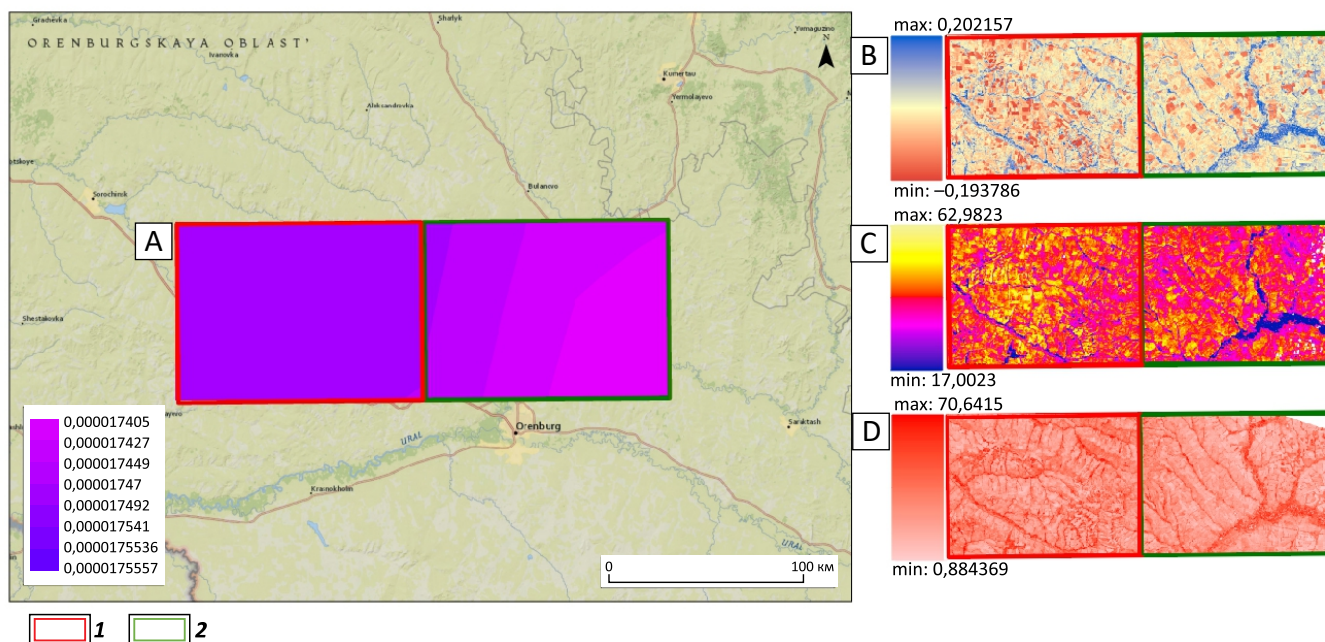
Fig. 1. Dynamics of the carbon dioxide content over zones 1 and 2 from 2015 to 2021



1 — зона 1 с преобладанием природно-техногенной геосистемы; **2** — зона 2 с преобладанием исходного ландшафта
1 — zone 1 with a predominance of natural and technogenic geosystem; **2** — zone 2 with a predominance of the initial landscape

Рис. 2. Исследуемые показатели на изучаемой территории в приуральской части Волго-Уральского степного региона

Fig. 2. The studied indicators in the study area of the Ural part of the Volga-Ural steppe region



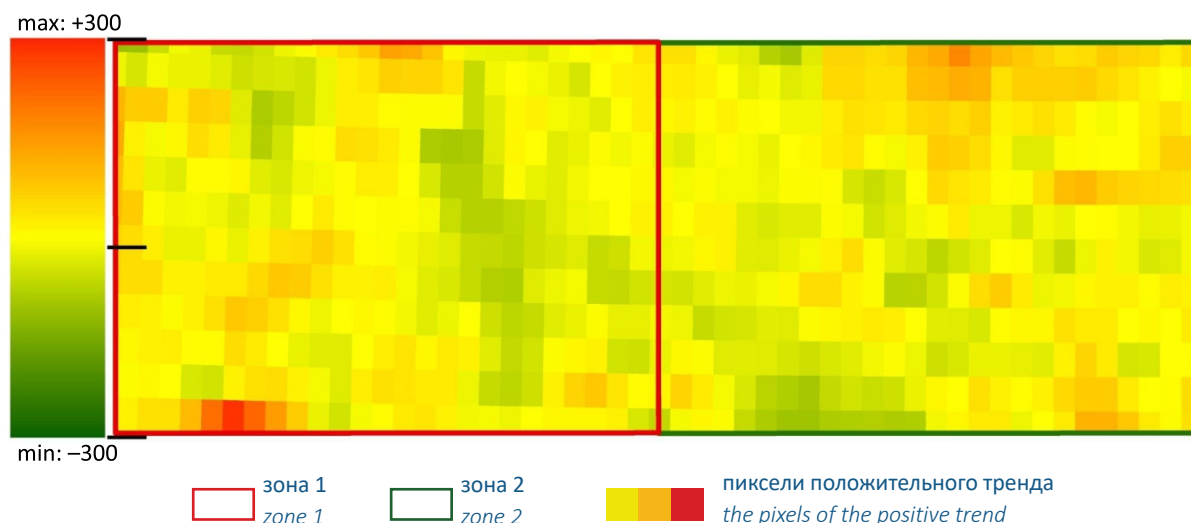
A — градиент тренда (изменения концентрации) диоксида углерода CO_2 , **B** — средние значения спектрального индекса содержания влаги в растительном покрове NDMI, **C** — средние значения температуры поверхности ландшафта ($^{\circ}C$), **D** — средние значения альбедо поверхности ландшафта (%) за период с 2013 по 2022 г.

A — the gradient of the carbon dioxide CO_2 trend (concentration changes), *B* — the average values of the vegetation cover moisture spectral index (NDMI), *C* — average values of landscape surface temperature ($^{\circ}C$), *D* — average values of landscape surface albedo (%) for the period from 2013 to 2022.

1 — зона 1 с преобладанием природно-техногенной геосистемы; **2** — зона 2 с преобладанием исходного ландшафта
1 — zone 1 with a predominance of natural and technogenic geosystem; **2** — zone 2 with a predominance of the initial landscape

Рис. 4. Тренды содержания метана над зонами 1 и 2 за период с 2018 по 2024 г.

Fig. 4. Trends in methane content over zones 1 and 2 for the period from 2018 to 2024



- в атмосфере исходной геосистемы зоны 2 отмечается повышенное относительно зоны 1 среднее содержание метана (в среднем на 2,144 ppbv),

- наблюдается синхронное снижение содержания диоксида углерода в воздухе обеих зон в июле–августе каждого года, в то время как максимальные концентрации отмечаются в период с января по март (разница зимних и летних значений в среднем составляет 0,00001 ppm),

- максимальные значения концентрации метана в атмосфере над зоной 1 (природно-техногенная геосистема) наблюдаются также в зимние месяцы (январь, февраль),

- отмечается тенденция медленного, но устойчивого повышения концентраций диоксида угле-

рода (~0,17 ppm/год) и метана (~12 ppbv/год) в атмосфере территории исследования из года в год как в зоне 1, так и в зоне 2.

Физические характеристики

Результаты анализа среднегодовых значений индекса содержания влаги в растительном покрове (см. рис. 2 В), температуры поверхности ландшафта (см. рис. 2 С), альбедо (см. рис. 2 D) за период с 2013 по 2022 г. представлены на рис. 1 и в табл. 2.

При расчетах приведенных в табл. 2 параметров из массива анализируемых пикселей исключалась (по маске) пойма р. Сакмара для получения более объективных результатов. Ожидается обнаружено стабильно пониженное содержания влаги в растительном покрове зоны 1 (природно-техно-

Табл. 2. Средние значения индекса содержания влаги в растительном покрове, температуры и альбедо поверхности ландшафта в границах территории исследования

Tab. 2. Average values of the moisture index in vegetation cover, temperature and albedo of the landscape surface within the study area

Показатель	Значение в зоне 1 (с природно-техногенной геосистемой)	Значение в зоне 2 (с преобладанием исходного ландшафта)	Разница средних значений в зонах 1 и 2	Спутник — источник данных
Значение спектрального индекса содержания влаги в растительном покрове (NDMI)	-0,056786	-0,047314	-0,009466	Landsat-8
Температура поверхности ландшафта, °С	32,475004	31,968262	0,506742	
Альбедо поверхности, %	21,942442	25,994088	-4, 051646	

генная геосистема) по сравнению с зоной 2, что объясняется трансформацией растительного покрова. Выявлено повышение температуры поверхности ландшафта в зоне 1 по сравнению с зоной 2, что также объясняется нарушением исходного почвенно-растительного покрова. По этой же причине в зоне 1 отмечается пониженное, по сравнению с зоной 2, альbedo ландшафта, способствующее более сильному нагреванию поверхности. Таким образом, можно говорить о локальных изменениях температурно-влажностного и радиационного балансов в техногенно-трансформированных ландшафтах зоны 1.

Выводы

1. Среднегодовые концентрации диоксида углерода в атмосфере зон с природно-техногенной геосистемой и с исходным ландшафтом различаются незначительно. При этом происходит стабильное синхронное повышение содержания диоксида углерода в столбе сухого воздуха за рассматриваемый период как в зоне 1 (природно-техногенная геосистема), так и в зоне 2 (исходные ландшафты). Минимумы содержания в атмосфере обеих зон наблюдаются в августе и сентябре, максимумы — в феврале и марте.

2. Содержание метана в атмосфере зоны 1 (природно-техногенная геосистема) в течение года в основном ниже, чем в атмосфере над зоной 2 (исходные ландшафты). Аналогично диоксиду углеро-

да происходит устойчивое повышение содержания метана в столбе сухого воздуха за рассматриваемый период как в зоне 1, так и в зоне 2. Пиковые значения содержания метана в атмосфере над зоной 1 (природно-техногенная геосистема) наблюдаются в зимние месяцы (январь, февраль).

3. Содержание влаги в растительном покрове зоны 1 (природно-техногенная геосистема) ниже, чем в растительном покрове зоны 2 (исходные ландшафты). Температура поверхности ландшафта в зоне 1 выше, чем в зоне 2 при том, что альbedo ландшафта в зоне 1 ниже, чем в зоне 2. Такие изменения связаны, по всей видимости, с нарушением исходного почвенно-растительного покрова в зоне функционирования природно-техногенной геосистемы.

4. Анализ современных спутниковых данных позволяет выполнить комплексный анализ состояния и динамики некоторых средообразующих параметров для больших территорий. На данный момент использованные снимки находятся в свободном доступе, что позволяет применять в работе весь имеющийся пополняемый массив данных. Опираясь на полученную информацию, можно планировать схему и маршрут полевых работ для уточнения и детализации происходящих в геосистемах изменений. Выводы, полученные по результатам таких комплексных исследований, призваны сыграть роль в решении современных эколого-климатических задач.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант №23-27-00193, №ГР 123012000040-7.

Список источников

1. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades // *Nature Climate Change*. – 2016. – Vol. 6. – No. 4. – pp. 394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
2. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China // *Soil and Tillage Research*. – 2017. – Vol. 174. – pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
3. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene // *Nature*. – 2015. – Vol. 519. – P. 171–180. DOI: 10.1038/nature14258.
4. Романовская А.А. Подходы к реализации экосистемных климатических проектов в России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 463–478. DOI: 10.31857/S2587556623040118.
5. Куричев Н.К., Птичников А.В., Шварц Е.А., Кренке А.Н. Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 619–636. DOI: 10.31857/S2587556623040040.
6. Nayak N., Mehrotra R., Mehrotra S. Carbon biosequestration strategies: a review // *Carbon Capture Science & Technology*. – 2022. – Vol. 4. – 100065. DOI: 10.1016/j.ccst.2022.100065.
7. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в среднетаежных лесах центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и важности почвы // *Экология*. – 2020. – № 1. – С. 51–61. DOI: 10.31857/S0367059720010060.
8. Menyailo O.V., Huwe B. Denitrification and C, N mineralization as function of temperature and moisture potential in organic and mineral horizons of an acid spruce forest soil // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 1999. – Vol. 162. – Iss. 5. – pp. 527–531. DOI: 10.1002/(sici)1522-2624(199910)162:5<527::aid-jpln527>3.0.co;2-%23.
9. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus, Series B*. – 1992. – Vol. 44. – Iss. 2. – pp. 81–99. DOI: 10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x.
10. Данилов-Данильян В.И. Экологический вызов и устойчивое развитие. — М. : Прогресс-Традиция, 2000. – 414 с.
11. Киселев А.А., Кароль И.Л. С метаном по жизни. — СПб. : ГГО, 2019. – 72 с.

12. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. – 2021. – Т. 7. – №. 1. – С. 6–34. DOI: 10.17072/2410-8553-2021-1-6-34.
13. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Динамика летне-осенней эмиссии CH₄ естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2007. – № 1. – С. 8–14. DOI: 10.3103/S0147687407010024.
14. Мячина К.В. Геоэкологические аспекты оптимизации степных ландшафтов в условиях разработки нефтегазовых месторождений. – М.: Медиа-Пресс, 2020. – 215 с.
15. Metz E.M., Vardag S.N., Basu S. et al. Soil respiration-driven CO₂ pulses dominate Australia's flux variability // Science. – 2023. – Vol. 379. – Iss. 6639. – pp. 1332–1335. DOI: 10.1126/science.add7833.
16. Chan K.L, Xu J., Slijkhuys S., Valks P., Loyola D.G. TROPospheric Monitoring Instrument observations of total column water vapour: algorithm and validation // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 821. – 153232. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153232.
17. Hosseini Chamani F., Farrokhian Firouzi A., Amerykhah H. Pedotransfer Function (PTF) for Estimation Soil moisture using NDVI, land surface temperature (LST) and normalized moisture (NDMI) indices // Journal of Water and Soil Conservation. – 2019. – Vol. 26. – Iss. 4. – pp. 239–254. DOI: 10.22069/JWSC.2019.15306.3053.
18. Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1983. – Vol. 49. – No. 1. – pp. 77–83.
19. Tang J., Luysaert S., Richardson A.D., Kutsch W., Janssens I.A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111. – No. 24. – pp. 8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.132076111.

References

1. Gleckler P.J., Durack P.J., Stouffer R.J., Johnson G.C., Forest C.E. Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. *Nature Climate Change*. 2016;6(4):394–398. DOI: 10.1038/nclimate2915.
2. Guo D., Wang J., Fu H., Wen H., Luo Y. Cropland has higher soil carbon residence time than grassland in the subsurface layer on the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*. 2017;174:130–138. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.003.
3. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015;519:171–180. DOI: 10.1038/nature14258.
4. Romanovskaya A.A. Approaches to implementing ecosystem climate projects in Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2023;87(4):463–478. DOI: 10.31857/S2587556623040118.
5. Kurichev N.K., Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Krenke A.N. Nature-based offsets in Russia: key challenges and conditions for success. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2023;87(4):619–636. DOI: 10.31857/S2587556623040040.
6. Nayak N., Mehrotra R., Mehrotra S. Carbon biosequestration strategies: a review. *Carbon Capture Science & Technology*. 2022;4:100065. DOI: 10.1016/j.ccst.2022.100065.
7. Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Verkhovets S.V., Tychkov I.I., Rubtsov A.V., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A., Menyailo O.V., Urban A.V. The impact of climatic factors on CO₂ emissions from soils of middle-taiga forests in Central Siberia: emission as a function of soil temperature and moisture. *Russian Journal of Ecology*. 2020;51(1):46–56. DOI: 10.1134/S1067413620010063.
8. Menyailo O.V., Huwe B. Denitrification and C, N mineralization as function of temperature and moisture potential in organic and mineral horizons of an acid spruce forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 1999;162(5):527–531. DOI: 10.1002/(SICI)1522-2624(199910)162:5%3C527::AID-JPLN527%3E3.0.CO;2-%23.
9. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus, Series B*. 1992;44(2):81–99. DOI: 10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x.
10. Danilov-Danil'yan V.I. Ecological challenge and sustainable development. Moscow: Progress-Traditsiya, 2000. 414 p.
11. Kiselev A.A., Karol' I.L. S metanom po zhizni [With methane through life]. St Petersburg: GGO; 2019. 72 p.
12. Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. *Anthropogenic transformation of nature*. 2021;7(1):6–34. DOI: 10.17072/2410-8553-2021-1-6-34.
13. Glagolev M.V., Shnyrev N.A. Dynamics of CH₄ emission an natural wetlands in summer- autumn period (on example of south Tomsk area). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2007;(1):8–14. DOI: 10.3103/S0147687407010024.
14. Myachina K.V. Geoehkologicheskie aspekty optimizatsii stepnykh landshaftov v usloviyakh razrabotki neftegazovykh mestorozhdenii [Geoeological aspects of optimizing steppe landscapes in the context of oil and gas field development]. Moscow: Media-Press; 2020. 215 p.
15. Metz E.M., Vardag S.N., Basu S. et al. Soil respiration-driven CO₂ pulses dominate Australia's flux variability. *Science*. 2023;379(6639):1332–1335. DOI: 10.1126/science.add7833.
16. Chan K.L, Xu J., Slijkhuys S., Valks P., Loyola D.G. TROPospheric Monitoring Instrument observations of total column water vapour: algorithm and validation. *Science of the Total Environment*. 2022;821:153232. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153232.
17. Hosseini Chamani F., Farrokhian Firouzi A., Amerykhah H. Pedotransfer Function (PTF) for Estimation Soil moisture using NDVI, land surface temperature (LST) and normalized moisture (NDMI) indices. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2019;26(4):239-254. DOI: 10.22069/JWSC.2019.15306.3053.
18. Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1983;49(1):77–83.
19. Tang J., Luysaert S., Richardson A.D., Kutsch W., Janssens I.A. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(24):8856–8860. DOI: 10.1073/pnas.132076111.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024 г., одобрена после рецензирования 25.09.2024 г., принята к публикации 27.11.2024 г.
The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Информация об авторах

Мячина Ксения Викторовна

Доктор географических наук, ведущий научный сотрудник,
зав. отделом природно-техногенных геосистем

Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН
460000 Оренбург, ул. Пионерская, д. 11

e-mail: mavicsen@list.ru

ORCID: 0000-0001-5190-1421

Scopus Author ID: 57217686210

ResearcherID: K-5099-2018

SPIN-код: 4734-1819

AuthorID: 155565

Щавелев Антон Николаевич

Аспирант, младший научный сотрудник

Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН
460000 Оренбург, ул. Пионерская, д. 11

e-mail: ditmark12rus@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7249-2193

SPIN-код: 9772-5310

AuthorID: 1144156

Ряхов Роман Васильевич

Научный сотрудник

Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН
460000 Оренбург, ул. Пионерская, д. 11

e-mail: remus.rv@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4762-3286

Scopus Author ID: 57223622892

ResearcherID: J-8188-2018

SPIN-код: 4622-0083

AuthorID: 835030

Information about authors

Ksenia V. Myachina

Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher
Head of the Department of natural and technogenic geosystems

Steppe Institute of the Ural Branch of the RAS
11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia

e-mail: mavicsen@list.ru

ORCID: 0000-0001-5190-1421

Scopus Author ID: 57217686210

ResearcherID: K-5099-2018

SPIN-код: 4734-1819

AuthorID: 155565

Anton N. Shchavalev

Junior Researcher

Steppe Institute of the Ural Branch of the RAS
11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia

e-mail: ditmark12rus@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7249-2193

SPIN-код: 9772-5310

AuthorID: 1144156

Roman V. Ryakhov

Researcher

Steppe Institute of the Ural Branch of the RAS
11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia

e-mail: remus.rv@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4762-3286

Scopus Author ID: 57223622892

ResearcherID: J-8188-2018

SPIN-код: 4622-0083

AuthorID: 835030