

УДК 911.9:528.8

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Оригинальная статья

Пространственно-временной анализ геоэкологического состояния атмосферы Чеченской Республики на основе спутниковых данных

К.В. Мячина^{1,2}, И.А. Керимов²

¹ Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН, Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, e-mail: oxprin@yandex.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 02.02.2026, доработана: 24.03.2026, принята к публикации: 26.03.2026

Резюме: Актуальность работы. Состав атмосферы оказывает влияние на климатические процессы, усиливая или смягчая действие парниковых газов. Природно-географические условия региона и уровень его промышленного развития влияют на динамику и взаимодействие постоянных и временных компонентов атмосферы, включая антропогенные примеси. **Задачи исследования:** выявить особенности пространственно-временных изменений некоторых компонентов атмосферы Чеченской Республики; проанализировать содержание парниковых газов и иных антропогенных примесей в атмосфере в связи с характеристиками высоты аэрозольного слоя и содержанием озона; определить пространственно-временные тренды компонентов атмосферы региона в привязке к его ландшафтно-экологическим зонам. **Методы.** Методом графического сопоставления анализировались переменные компоненты состава атмосферы (аэрозоли, озон), парниковые газы (водяной пар, диоксид углерода, метан), антропогенные загрязнители (диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид). Для получения данных о содержании указанных веществ использовались продукты спутников Sentinel-5P и OCO. **Результаты.** Максимальное содержание водяного пара отмечается в центральной и северной равнинных частях региона, минимальное – в горных и предгорных районах. Максимальные значения диоксида углерода прослеживаются в равнинных полупустынных и степных северных районах. Между содержаниями диоксида углерода и водяного пара существует обратная зависимость. Прослеживается прямая зависимость между содержаниями диоксида углерода, озона и высотой аэрозольного слоя во всех ландшафтно-экологических зонах, независимо от ранга антропогенной нагрузки. Между содержаниями водяного пара и озона отмечается обратная зависимость. Максимальные показатели метана наблюдаются в атмосфере предгорья и равнинно-степного северного района. Озон и оксид брома в атмосфере Чеченской Республики распределены практически равномерно, а максимальные концентрации диоксида азота наблюдаются в северных равнинных районах. Глиоксаль и формальдегид показывают более высокие концентрации в северных степных районах. Между содержаниями формальдегида и глиоксаля прослеживается прямая зависимость на фоне обратной зависимости между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Выявлена прямая зависимость между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. Для этих трех веществ прослеживается обратная связь с содержанием водяного пара. В регионе отмечаются устойчивые тенденции, соответствующие общемировым, к повышению концентрации диоксида углерода и метана и к снижению содержания водяного пара в атмосфере.

Ключевые слова: спутниковые данные, парниковые газы, компоненты химического состава атмосферы, антропогенные примеси, пространственно-временная динамика, ландшафтно-экологические зоны, ранг антропогенной нагрузки, Чеченская Республика.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Мячина К.В., Керимов И.А. Пространственно-временной анализ геоэкологического состояния атмосферы Чеченской Республики на основе спутниковых данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 204-216. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Original paper

Spatial and temporal analysis of the geoecological state of the Chechen Republic atmosphere based on satellite data

K.V. Myachina^{1,2}, I.A. Kerimov²

¹ Steppe Institute, Ural Branch Russian Academy of Sciences, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
11 Pionerskaya Str., Orenburg 460000, Russian Federation,
e-mail: oxprin@yandex.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 02.02.2026, revised: 24.03.2026, accepted: 26.03.2026

Abstract: Relevance. The composition of the atmosphere influences climate processes by enhancing or mitigating the effects of greenhouse gases. The natural and geographical conditions of the region and the level of its industrial development affect the dynamics and interaction of permanent and temporary components of the atmosphere, including anthropogenic impurities. **Research objectives:** to identify the features of spatiotemporal changes in some components of the atmosphere of the Chechen Republic; to analyze the content of greenhouse gases and other anthropogenic impurities in the atmosphere in connection with the characteristics of the aerosol layer height and ozone content; to determine the spatial and temporal trends of the atmospheric components of the region in relation to its landscape and ecological zones. **Methods.** The variable components of the atmospheric composition (aerosols, ozone), greenhouse gases (water vapor, carbon dioxide, methane), anthropogenic pollutants (nitrogen dioxide, bromine oxide, glyoxal, formaldehyde) were analyzed by graphical comparison. To obtain data on the content of these substances, Sentinel-5P and OCO satellite products were used. **Results.** The maximum water vapor content is observed in the central and northern lowland parts of the region, the minimum – in mountainous and foothill areas. The maximum values of carbon dioxide can be traced in the lowland semi-desert and steppe northern regions. There is an inverse relationship between the content of carbon dioxide and water vapor. There is a direct relationship between the content of carbon dioxide, ozone and the height of the aerosol layer in all landscape-ecological zones, regardless of the rank of anthropogenic impact. There is an inverse relationship between the content of water vapor and ozone. The maximum methane levels are observed in the atmosphere of the foothills and the lowland-steppe northern region. Ozone and bromine oxide in the atmosphere of the Chechen Republic are distributed almost evenly, and the maximum concentrations of nitrogen dioxide are observed in the northern lowland regions. Glyoxal and formaldehyde show higher concentrations in the northern steppe regions. There is a direct relationship between the content of formaldehyde and glyoxal against the background of the inverse relationship between these two components and nitrogen dioxide, bromine oxide and ozone. A direct relationship between the content of nitrogen dioxide, bromine oxide and ozone has been revealed. For these three substances, there is an inverse relationship with the water vapor content. There are steady trends in the region, consistent with global trends, towards an increase in the concentration of carbon dioxide and methane and a decrease in the content of water vapor in the atmosphere.

Keywords: satellite data, greenhouse gases, components of the chemical composition of the atmosphere, anthropogenic impurities, spatial and temporal dynamics, landscape and ecological zones, rank of anthropogenic impact, Chechen Republic.

Acknowledgements: The work was supported by the state assignment of the Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov FZNU-2024-0002.

For citation: Myachina K.V., Kerimov I.A. Spatial and temporal analysis of the geoecological state of the Chechen Republic atmosphere based on satellite data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(1): 204-216. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.64.001

Введение

В последние десятилетия, в свете климатических изменений и их последствий, проблема геоэкологического состояния атмосферы стала одной из наиболее актуальных и обсуждаемых на уровне научного и общественного дискурса. Среди факторов, способствующих усилению парникового эффекта и глобальному потеплению, особое значение имеют такие переменные компоненты атмосферы, как парниковые газы: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и водяной пар [Lewis, Maslin, 2015; Gleckler et al., 2016; Guo et al., 2017]. Химический состав атмосферы, включая комплекс антропогенных примесей, оказывает значительное влияние на климатические процессы и здоровье населения [Заалишвили и др., 2023]. Многостороннее взаимодействие компонентов атмосферы приводит как к усилению, так и к смягчению действия парниковых газов.

Современным инструментом для отслеживания состояния компонентов экосистем как на глобальном, так и на региональном уровне стал космический мониторинг, позволяющий получить актуальную информацию, в том числе и о пространственно-временной динамике атмосферных компонентов [Тронин и др., 2021; Вареник и др., 2021; Медведева и др., 2024]. На их концентрацию, взаимодействие и перенос в значительной степени влияют региональные природно-географические характеристики, включая уровень промышленного развития и урбанизации [Веремчук и др., 2015; Zhao et al., 2022; Sun et al., 2019]. Анализ особенностей совместного присутствия в атмосфере региона парниковых газов и ряда антропогенных примесей, с выявлением аспектов их взаимодействия, призван внести вклад в понимание механизмов формирования и распространения парниковых газов в Чеченской Республике для дальнейшей оценки их влияния на климатические процессы и экологическую ситуацию в регионе.

Задачи исследования:

1 – оценить пространственно-временную динамику концентрации некоторых переменных компонентов атмосферы, включая антропогенные примеси, над территорией Чеченской Республики;

2 – выполнить ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки для анализа ее связи с распределением переменных компонентов в атмосфере;

3 – проанализировать пространственно-временные особенности содержания парниковых газов и иных антропогенных примесей (диоксида азота, оксида брома, формальдегида, глиоксаля) в атмосфере региона в связи с такими ее характеристиками, как высота аэрозольного слоя и содержание озона;

4 – проанализировать пространственно-временные тренды компонентов атмосферы Чеченской Республики в привязке к ландшафтно-экологическим зонам региона.

Объекты и методы

Объектом исследования является атмосфера Чеченской Республики. Для получения данных о содержании антропогенных примесей в атмосфере, в том числе – парниковых газов, использовались продукты спутника Sentinel-5P третьего уровня обработки за период с 2018 по 2024 гг. для всех показателей, кроме диоксида углерода. Анализ диоксида углерода выполнен с помощью продуктов спутника ОСО, доступных за период с 2018 по 2022 гг. Анализировались переменные компоненты состава атмосферы (аэрозоли, озон), антропогенные загрязнители (диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид), в том числе – парниковые газы (водяной пар, диоксид углерода, метан). Вещества в атмосфере находятся в сложном взаимодействии, образуя единую систему, регулирующую баланс тепла и влияющую на парниковый эффект. Водяной пар – главный парниковый газ, по большей части природного происхождения, усиливающий парниковый эффект за счет обратной связи: повышение температуры увеличивает влажность, что усиливает парниковый эффект, снова по-

вышающий температуру. Диоксид углерода и метан – основные антропогенные парниковые газы, усиливающие теплоизоляцию атмосферы. Двойственное, практически противоположное действие оказывает содержащийся в ней озон: в тропосфере действует как парниковый газ, усиливая нагрев, а в стратосфере защищает от ультрафиолетового излучения. Аналогично, аэрозоли могут как охлаждать, так и нагревать атмосферу: отражая солнечный свет, создавать эффект охлаждения, или наоборот, поглощать тепло (черные углеродные частицы). В свою очередь, повышение концентрации парниковых газов может изменять состав и свойства аэрозолей, например, за счет изменения влажности или химического состава атмосферы. Диоксид азота и монооксид брома участвуют в химических реакциях, образуя озон и другие соединения, влияющие на парниковый эффект. Глиоксаль и формальдегид – продукты фотохимических реакций, участвующие в образовании аэрозолей и озона [Soderlund, Svensson, 1976; Soden, Held, 2006; Schulz et al., 2006; Solomon et al., 2011; Ciaia et al., 2014].

По каждому из девяти вышеперечисленных показателей собирались и анализировались ежемесячные данные. Анализ особенностей пространственно-временной динамики концентрации компонентов атмосферы Чеченской Республики и анализ их трендов выполнялся с помощью методов графического сопоставления и ГИС-интерполяции пространственных данных. Затем, на основе балльной системы оценок, выполнялось ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки. Среднемесячные значения концентрации анализируемых веществ за исследуемый период рассчитывались для атмосферы каждой из выделенных ранее ландшафтно-экологических зон (ЛЭЗ) Чеченской Республики (рис. 1).

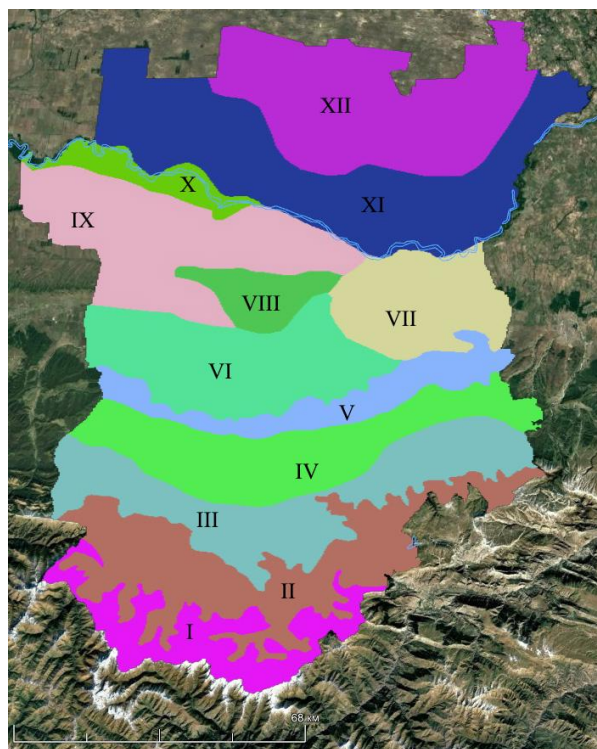


Рис. 1. Ландшафтно-экологическое зонирование территории Чеченской Республики, где I – Высокогорная нивально-гляциальная ЛЭЗ, II – Высокогорная горно-луговая ЛЭЗ, III – Высокогорная горнолесная ЛЭЗ, IV – Среднегорно-низкогорная ЛЭЗ широколиственных лесов, V – Низкогорная лесолуговая ЛЭЗ, VI – Предгорно-равнинная лесостепная и степная ЛЭЗ, VII – Восточная равнинно-холмистая степная и лесостепная ЛЭЗ, VIII – Центральная равнинно-холмистая степная ЛЭЗ, IX – Терско-Сунженская холмисто-равнинная степная ЛЭЗ, X – Притеречно-равнинная степная ЛЭЗ, XI – Затеречная равнинная степная ЛЭЗ, XII – Затеречная равнинная полупустынная ЛЭЗ /

Fig. 1. Landscape and ecological zoning of the territory of the Chechen Republic, where I is a High-altitude nival–glacial landscape and ecological zone (LEZ), II is a High-altitude mountain–meadow LEZ, III is a High-altitude mountain–forest LEZ, IV is a Medium–mountain–low–mountain LEZ of broad-leaved forests, V is a Low-mountain lowland LEZ, VI is a Foothill–plain forest–steppe and steppe LEZ, VII is an Eastern plain–hilly steppe and forest–steppe LEZ, VIII is a Central plain–hilly steppe LEZ, IX – Tersko-Sunzhenskaya hilly–plain steppe LEZ, X is a Twilight–plain steppe LEZ, XI is a Twilight plain steppe LEZ, XII is a Shadowy lowland semi-desert lane LEZ

Результаты и обсуждение

1. Особенности пространственно-временной динамики концентрации некоторых переменных компонентов атмосферы, в том числе ее антропогенных загрязнителей, над территорией Чеченской Республики.

Как видно на рисунке 1, в пределах региона исследования выделено 12 ЛЭЗ. В атмосфере каждой из них рассчитывались концентрации анализируемых компонентов за период с 2018 по 2024 гг. Ожидалось, что их общая динамика будет относительно схожей для большей части ЛЭЗ, а изменение содержания каждого отдельного компонента будет иметь свои особенности.

Выявлено, что общие закономерности изменений концентраций исследуемых веществ являются сезонными и аналогичны для всех 12 ЛЭЗ. Максимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются в ноябре-марте, содержания водяного пара – в июне-сентябре, озона – в январе-марте, диоксида азота – в ноябре-марте, оксида брома – в январе-марте, глиоксаля – в мае-июле, формальдегида – в июне-августе, диоксида углерода – в январе-марте, с тенденцией неуклонного ежегодного роста концентрации. Сезонные закономерности содержания метана в атмосфере региона четко не выявляются, но, аналогично диоксиду углерода, наблюдается его неуклонный рост. Пространственно-временная динамика высоты аэрозольного слоя и содержания водяного пара в атмосфере региона представлена на рисунках 2 и 3.

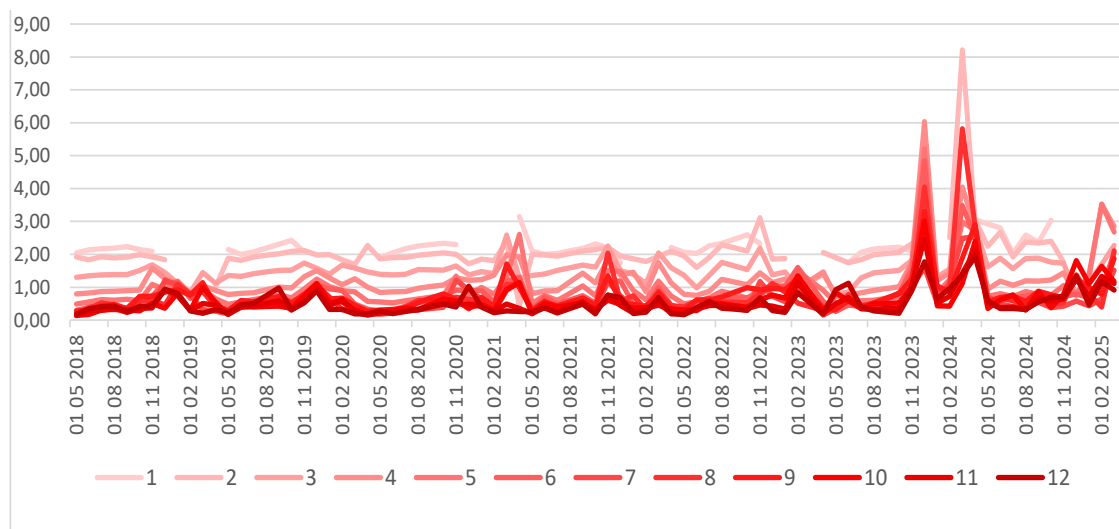


Рис. 2. Динамика высоты аэрозольного слоя в атмосфере Чеченской Республики за 2018–2024 гг., где по оси x отложены даты измерений в указанном периоде, по оси y – высота столба аэрозоля (км); 1–12 – цвет линии графика для каждого из 12 классов ландшафтного покрова /

Fig. 2. Dynamics of the aerosol layer height in the atmosphere of the Chechen Republic for 2018–2024, where the measurement dates in the specified period are plotted on the x-axis, the height of the aerosol column (km) on the y-axis; 1–12 is the color of the graph line for each of the 12 classes of landscape cover

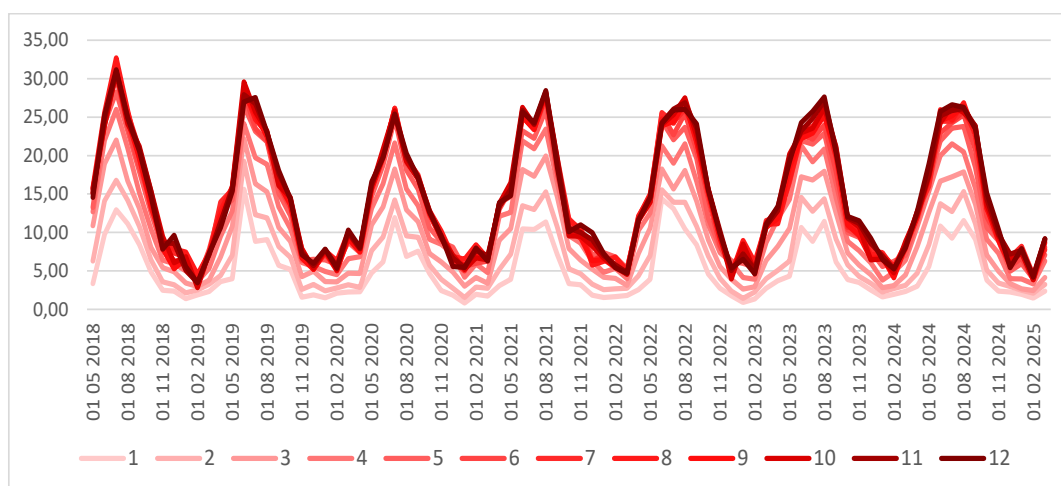


Рис. 3. Динамика содержания водяного пара в атмосфере Чеченской Республики за 2018–2024 гг., где по оси x отложены даты измерений в указанном периоде, по оси y – средняя концентрация водяного пара ($\text{кг}/\text{м}^3$); 1–12 – цвет линии графика для каждого из 12 классов ландшафтного покрова /

Fig. 3. Dynamics of water vapor content in the atmosphere of the Chechen Republic for 2018–2024, where the measurement dates in the specified period are plotted on the x -axis, the average concentration of water vapor (kg/m^3) on the y -axis; 1–12 is the color of the graph line for each of the 12 classes of landscape cover

Параллельно можно проследить разницу в содержании анализируемых веществ в атмосфере каждой ЛЭЗ. Независимо от сезона года, минимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются над ЛЭЗ VII–XII, расположенными в центральной и северной равнинно-степных частях региона, максимальные – в горных и предгорных районах. И наоборот, максимальное содержание водяного пара отмечается над равнинными ЛЭЗ центральной и северной частей региона, минимальные – в горных и предгорных районах. Озон в атмосфере Чеченской Республики распределен практически равномерно, лишь с незначительным превышением в северных степных ЛЭЗ. Максимальные концентрации диоксида азота также наблюдаются в северных степных ЛЭЗ VII–XII; в этих же районах выявляются положительные зимние экстремумы значений, в отличие от предгорных и горных территорий, где сезонные колебания значений диоксида азота более сглажены. Содержание оксида брома, аналогично озону, практически не меняется в атмосфере ЛЭЗ. Глиоксаль и формальдегид показывают чуть более высокие концентрации в северных степных ЛЭЗ. Диоксид углерода в атмосфере региона распределен неравномерно: максимальные значения прослеживаются в северной части, в равнинных полупустынных и степных районах; в центральных районах республики концентрации диоксида углерода планомерно снижаются и принимают минимальные значения на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах. Наиболее высокие показатели содержания метана наблюдаются в атмосфере предгорных и равнинно-степном северном районах Чеченской Республики, что, возможно, обусловлено наличием значительного поголовья крупного и мелкого рогатого скота.

2. Ранжирование территории региона по уровням антропогенной нагрузки для выявления ее связи с распределением переменных компонентов и загрязняющих примесей в атмосфере региона.

Уровень антропогенной нагрузки рассчитывался для каждой ЛЭЗ путем суммирования баллов, присвоенных в ходе экспертной оценки влияния основных видов хозяйственной деятельности на ландшафты [Кочуров, Карандеев, 2018; Мукаев, Озгелдинова, 2018; Басова, 2010; Мячина, 2013]. Баллы назначались с учетом масштаба влияния различных типов природопользования в пределах ЛЭЗ, выявленного на основе собранной нами ранее статистики площадей классов землепользования в регионе исследования [Мячина и др., 2025]. Суммарные баллы антропогенной нагрузки на ландшафты каждой ЛЭЗ позволили ранжировать территорию региона по уровням антропогенной нагрузки. Полученные ранги представлены на рисунке 4.

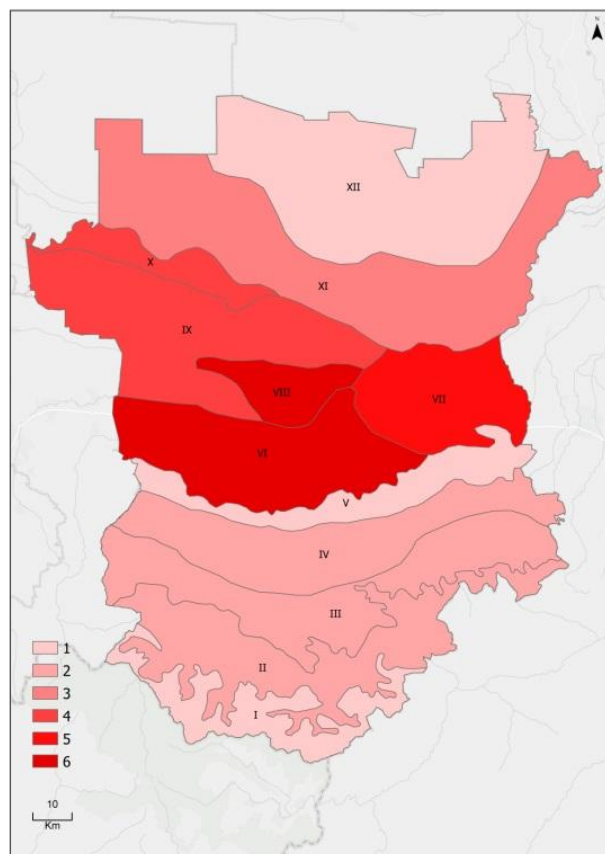


Рис. 4. Ранжирование территории Чеченской Республики по уровням антропогенной нагрузки, где I-XII – ландшафтно-экологические зоны, а цветовая шкала в красных оттенках демонстрирует ранги антропогенной нагрузки на ландшафты, где 1 – минимальная нагрузка, 6 – максимальная нагрузка /

Fig. 4. Ranking of the territory of the Chechen Republic by levels of anthropogenic impact, where I-XII are landscape and ecological zones, and the color scale in red shades shows the ranks of anthropogenic impact on landscapes, where 1 is the minimum impact, 6 is the maximum impact

3. Анализ пространственно-временных особенностей содержания парниковых газов в атмосфере региона в связи с такими ее характеристиками, как высота аэрозольного слоя и содержание озона.

Анализ выполнялся для атмосферы каждой ЛЭЗ с привязкой к ранжированию по уровням антропогенной нагрузки. Построены графики содержания парниковых газов диоксида углерода и метана в атмосфере каждой ЛЭЗ. Полученные данные сопоставлены с рангами антропогенной нагрузки и распределением таких характеристик атмосферы, как высота аэрозольного слоя и концентрация озона (рис. 5).

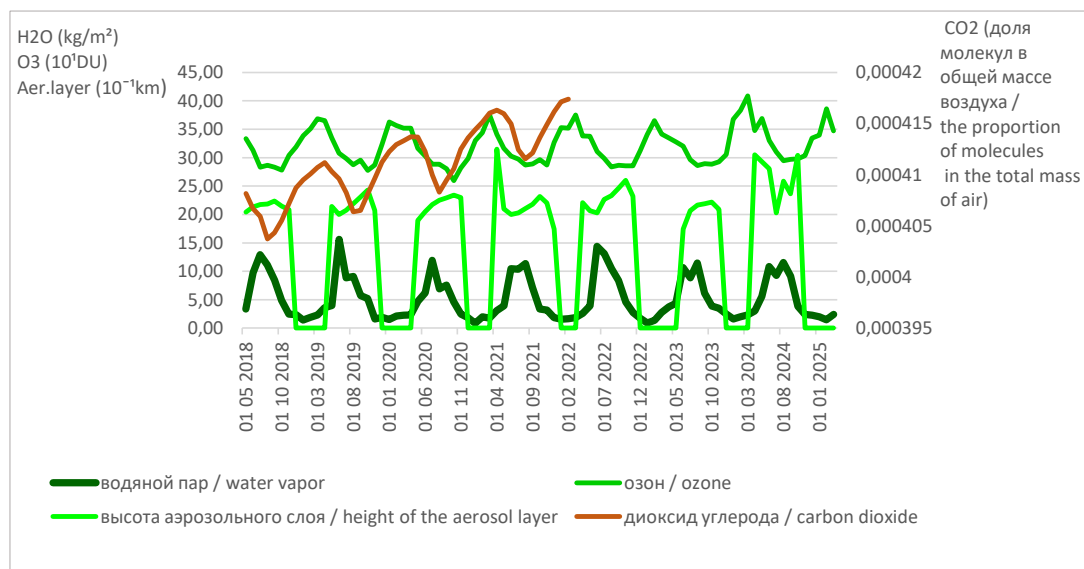


Рис. 5. Динамика содержания диоксида углерода в атмосфере ЛЭЗ VI (6 максимальный ранг антропогенной нагрузки) за период с 2018 по 2022 гг. в связи с динамикой водяного пара, озона и высоты аэрозольного слоя /

Fig. 5. Dynamics of carbon dioxide content in the atmosphere of LEZ VI (6 maximum anthropogenic impact rank) for the period from 2018 to 2022 in connection with the dynamics of water vapor; ozone and the height of the aerosol layer

Нужно отметить следующее ограничение: для первой, второй, третьей и, частично, четвертой ЛЭЗ, расположенных в горной местности, затруднительно безошибочно определить концентрацию метана из-за ограничения угла наклона спутника.

Выявлено, что в атмосфере всех ЛЭЗ, независимо от ранга антропогенной нагрузки, существует прямая корреляция содержания диоксида углерода (CO_2) с содержанием озона (O_3) и с высотой аэрозольного слоя. Между содержаниями диоксида углерода и водяного пара отмечается обратная корреляция. Такая закономерность распределения диоксида углерода в атмосфере региона согласуется с результатами, полученными авторами ранее [Мячина и др., 2024].

Между содержаниями водяного пара и озона, содержанием водяного пара и высотой аэрозольного слоя также выявлена обратная корреляция; между содержанием озона и высотой аэрозольного слоя отмечается прямая корреляция.

В атмосфере VI, VII и VIII ландшафтно-экологических зон, относящихся к 5 и 6 рангам антропогенной нагрузки, выявляется обратная корреляция между содержаниями озона и метана (CH_4), что, возможно, объясняется значимым уровнем концентрации диоксида азота (NO_2) в атмосфере указанных ЛЭЗ. Все вышеперечисленное справедливо для равнинных территорий V–XII ЛЭЗ, в то время как показатели для I, II, III и, частично, IV ЛЭЗ отличаются некоторыми искажениями из-за наклона угла спутника в гористой местности.

Выделены общие закономерности динамики компонентов атмосферы каждой ЛЭЗ. Во всех ЛЭЗ, независимо от ранга антропогенной нагрузки, выявляется прямая связь между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. У трех указанных веществ наблюдается обратная связь с содержанием водяного пара. Между содержаниями формальдегида и глиоксаля также прослеживается прямая связь на фоне обратной связи между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Соответственно, формальдегид и глиоксаль демонстрируют прямую связь с содержанием водяного пара.

Можно отметить ряд особенностей в распределении антропогенных загрязнителей в атмосфере Чеченской Республики в привязке к ЛЭЗ и ландшафтам с различными рангами антропогенной нагрузки. Так, в атмосфере ЛЭЗ, относящихся к минимальному рангу антропогенной нагрузки (ранг 1) наблюдаются концентрации диоксида азота и оксида брома, сопоставимые с концентрациями этих веществ в зонах с максимальным рангом антропогенной нагрузки (ранг 6). Концентрации формальдегида и глиоксаля также не выказывают зависимости от ранга антропогенной нагрузки в пределах ландшафтно-экологических зон. Наиболее высокая концентрация этих веществ выявляется над ЛЭЗ X и VI (4 и 6 ранг антропогенной нагрузки соответственно). Судя по всему, содержание исследуемых антропогенных примесей в первую очередь зависит от природных условий ЛЭЗ. Например, оксид брома показывает максимальные значения в горной местности, несмотря на то, что горные ЛЭЗ относятся к 1 и 2 рангу экологической опасности, в то время как в ЛЭЗ равнинных территорий с высокими уровнями экологической опасности оксид брома демонстрирует более низкие концентрации.

4. Общие пространственно-временные тренды компонентов атмосферы Чеченской Республики в привязке к ландшафтно-экологическим зонам региона.

Для анализа особенностей динамики содержания изучаемых веществ в атмосфере региона построены картосхемы их пространственно-временных трендов за исследуемый период. Обнаружено, что концентрация водяного пара в атмосфере региона снижается над всеми ЛЭЗ, кроме горных. Максимальное снижение содержания водяного пара прослеживается в атмосфере VI и VIII ЛЭЗ, отнесенных к максимальному 6 рангу антропогенной нагрузки (рис. 6).

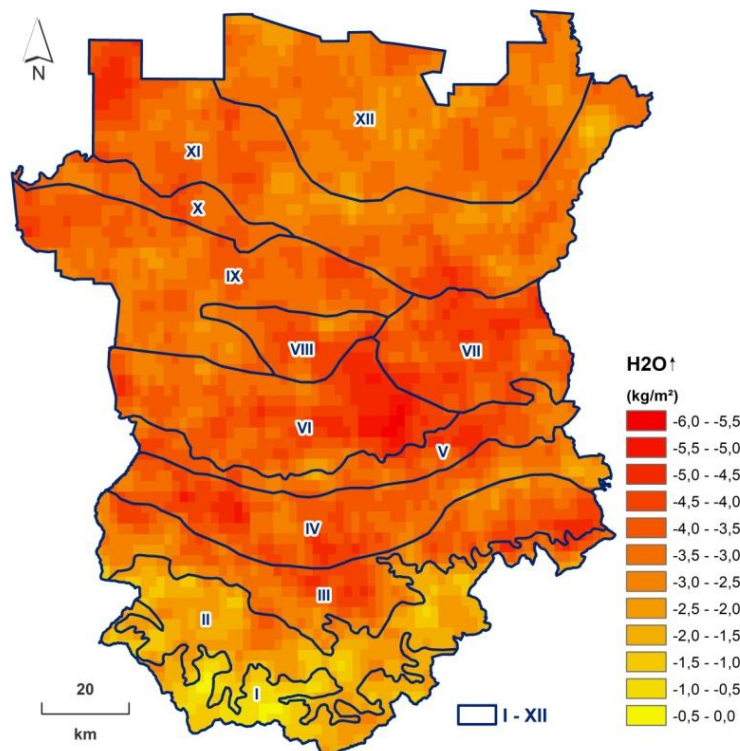


Рис. 6. Пространственно-временные тренды содержания водяного пара в атмосфере Чеченской Республики за период с 2018 по 2024 гг. (цветовая шкала), где I-XII – ландшафтно-экологические зоны /

Fig. 6. Spatial and temporal trends of water vapor content in the atmosphere of the Chechen Republic for the period from 2018 to 2024, (color scale), where I-XII are landscape-ecological zones

Концентрация озона в атмосфере региона демонстрирует тенденцию к росту, особенно заметную в горных и предгорных ЛЭЗ. Содержание диоксида азота в атмосфере Чеченской Республики относительно стабильно (и даже снижается) в северных равнинных и южных горных районах, в то время как в центральной части региона, относящейся к 5 и 6 максимальным рангам антропогенной нагрузки, концентрация диоксида азота ощутимо выросла за исследуемый шестилетний период.

Содержание оксида брома в атмосфере региона демонстрирует почти равномерный устойчивый рост. Содержание глиоксаля за исследуемый период показывает стремление к снижению, за исключением западной части горной территории и отдельных мелких ареалов равнинной зоны в центре и на севере региона. Содержание формальдегида устойчиво снижается над всей территорией региона, кроме горных и предгорных районов в его южной части. Парниковый газ диоксид углерода демонстрирует устойчивый рост концентрации в атмосфере региона. В то же время, на равнинных территориях центральной и северной частей региона рост концентрации происходит медленнее, чем в горных экологических районах. Парниковый газ метан также демонстрирует тенденцию к росту, особенно явную над ЛЭЗ, относящимися к 5 и 6 максимальным рангам антропогенной нагрузки, а также в северо-восточной равнинной части области, где, вероятно, расположены многочисленные пастбищные угодья.

Выводы

Общие закономерности динамики содержания в атмосфере таких компонентов, как водяной пар, озон, диоксид углерода, диоксид азота, оксид брома, глиоксаль, формальдегид и метан являются сезонными и практически аналогичны для всех 12 ландшафтно-экологических зон Чеченской Республики. Максимальные содержания основного парникового газа – водяного пара – отмечаются над ландшафтно-экологическими зонами в центральной и северной равнинных частях региона, минимальные – в горных и предгорных районах. Наблюдается общая тенденция к снижению его концентрации над территорией региона, что особенно заметно над ландшафтно-экологическими зонами, приуроченными к территориям с максимальным шестым рангом антропогенной нагрузки.

Максимальные значения концентрации парникового газа диоксида углерода прослеживаются в северной части Чеченской Республики, в равнинных полупустынных и степных районах. Над центральными районами региона концентрация диоксида углерода плавно снижается, принимая минимальные значения на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах. При этом между содержаниями диоксида углерода и водяного пара отмечается обратная связь. Во всех ландшафтно-экологических зонах, независимо от ранга антропогенной нагрузки, прослеживается прямая связь между содержанием диоксида углерода, содержанием озона и высотой аэрозольного слоя. И наоборот, в парах «содержание водяного пара – содержание озона» и «содержание водяного пара – высота аэрозольного слоя» отмечается обратная связь. При этом минимальные значения высоты аэрозольного слоя наблюдаются над ландшафтно-экологическими зонами VII–XII, расположенными в центральной и северной равнинно-степных частях региона, максимальные – в горных и предгорных районах.

Наиболее высокие показатели парникового газа метана наблюдаются в атмосфере предгорных районов и равнинно-степного северного экологического района.

Озон и оксид брома в атмосфере Чеченской Республики распределены практически равномерно, а максимальные концентрации диоксида азота наблюдаются в северных равнинных районах. Глиоксаль и формальдегид демонстрируют более вы-

сокие концентрации в северных степных районах. Между содержаниями формальдегида и глиоксаля прослеживается прямая связь на фоне обратной связи между этими двумя компонентами и диоксидом азота, оксидом брома и озоном. Соответственно, формальдегид и глиоксаль выказывают прямую связь с содержанием водяного пара.

В атмосфере всех ландшафтно-экологических зон, независимо от ранга антропогенной нагрузки, выявляется прямая зависимость между содержаниями диоксида азота, оксида брома и озона. Для этих трех веществ также прослеживается обратная связь с содержанием водяного пара.

Независимо от динамики концентрации атмосферных загрязнителей и вариантов их взаимовлияния, в регионе отмечаются тенденции, соответствующие общемировым, к повышению концентрации парниковых газов диоксида углерода и метана и к снижению содержания водяного пара.

Можно говорить о значительном влиянии воздушного массопереноса на распределение изучаемых веществ в атмосфере Чеченской Республики. Особенность региона исследования заключается в сочетании равнинной и горной территорий; формирующиеся ламинарные и турбулентные воздушные потоки взаимодействуют с образованием вихрей, способствующих активному перемешиванию воздушных масс, вертикальному и горизонтальному переносу загрязнений.

Литература

1. Басова Т.А. Оценка антропогенной нарушенности ландшафтов Акмолинской области. // География и водные ресурсы. – 2010. – № 4. – С. 28–33.
2. Вареник А.В., Калинин Д.В., Мыслина М.А. Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным. Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37. № 3(219). – С. 350–361.
3. Веремчук Л.В., Янькова В.И., Виткина Т.И., Голохваст К.С., Барскова Л.С. Загрязнение атмосферы урбанизированной территории как системный процесс взаимодействия факторов окружающей среды. // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2015. – Т. 61. № 3. – С. 35–42.
4. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.
5. Кочуров Б.И., Карандеев А.Ю. Геоэкологическое картографирование и оценка городского пространства с применением сеточного векторного ГИС-анализа. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24. № 1. – С. 310–320.
6. Медведева И.В., Татарников А.В., Едемский И.К., Саункин А.В. Сезонные вариации атмосферных примесей в Байкальском регионе по данным спутниковых наблюдений Aura MLS. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. № 2. – С. 315–324.
7. Мукаев Ж.Т., Озгелдинова Ж.О. Оценка антропогенного воздействия на ландшафты бассейна озера Алаколь. // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 4(91). – С. 94–102.
8. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Дубровская С.А. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010.
9. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н. Особенности регионального распределения парниковых газов в зависимости от ландшафтно-географических факторов (на примере Чеченской Республики). // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2025. – Т. 69. № 4. – С. 45–58. DOI: 10.30533/GiA-2025-046.
10. Мячина К.В. Анализ космических изображений с расчетом NDVI для изучения динамики ландшафтного покрова территории нефтяного месторождения в Оренбургской области. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 4(42). – С. 206–209.

11. Тронин А.А., Киселев А.В., Васильев М.П., Седеева М.С., Неробелов Г.М. Мониторинг содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным в условиях пандемии COVID-19. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2021. – Т. 18. № 3. – С. 309–313.
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., House J.I. Carbon and other biogeochemical cycles. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge University Press, 2014. – С. 465–570.
13. 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.
14. 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.
15. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. // *Nature*. – 2015. – Vol. 519(7542). – pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
16. Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T. et al. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2006. – Vol. 6. No. 12. – pp. 5225–5246
17. Soden B.J., Held I.M. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. // *Journal of Climate*. – 2006. – Vol. 19. No. 14. – pp. 3354–3360.
18. Soderlund R., Svensson B.H. The global nitrogen cycle. // *Ecological Bulletins*. – 1976. – pp. 23–73.
19. Solomon S., Daniel J.S., Neely III R.R., Vernier J.P., Dutton E.G., Thomason L.W. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. // *Science*. – 2011. – Vol. 333. No. 6044. – pp. 866–870.
20. Sun Z., Zhan D., Jin F. Spatio-temporal characteristics and geographical determinants of air quality in cities at the prefecture level and above in China. // *Chinese Geographical Science*. – 2019. – Vol. 29. No. 2. – pp. 316–324.
21. Zhao Y., Zhang X., Chen M., Gao S., Li R. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors. // *Journal of Geographical Sciences*. – 2022. – Vol. 32. No. 5. – С. 853–872.

References

1. Basova T.A. Assessment of anthropogenic disturbance of landscapes of the Akmola region. *Geography and Water Resources*. 2010. No. 4. pp. 28–33. (In Russ.)
2. Varenik A.V., Kalinskaya D.V., Myslina M.A. Investigation of suspended microparticles in the atmosphere of the coastal zone of the Black Sea based on natural and satellite data. *Marine Hydrophysical Journal*. 2021. Vol. 37. No. 3(219). pp. 350–361. (In Russ.)
3. Veremchuk L.V., Yankova V.I., Vitkina T.I., Golokhvast K.S., Barskova L.S. The atmospheric pollution in urbanized territories as a system process of the interaction of environmental factors. *Health. Medical Ecology. Science*. 2015. Vol. 61. No. 3. pp. 35–42. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011. (In Russ.)
5. Kochurov B.I., Karandeev A.Yu. Urban space geocological mapping and assessment with vector fishnet GIS analysis. *The InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24. No. 1. pp. 310–320. (In Russ.)
6. Medvedeva I.V., Tatarnikov A.V., Edemskiy I.K., Saunkin A.V. Seasonal variations in the atmospheric constituents in the Baikal region from Aura MLS satellite observations. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2024. Vol. 21. No. 2. p. 315–324. (In Russ.)
7. Mukaev Zh.T., Ozgeldinova Zh.O. Assessment of anthropogenic impact on the landscapes of Lake Alakol basin. *Hydrometeorology and Ecology*. 2018. No. 4(91). pp. 94–102. (In Russ.)
8. Myachina K.V., Kerimov I.A., Rakhov R.V., Dubrovskaya S.A. Study of the landscape absorption capacity regarding to carbon dioxide using remote sensing data (steppe, forest-steppe and mountain-forest regions of Southern Russia as examples). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 141–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.41.38.010 (In Russ.)

9. Myachina K.V., Kerimov I.A., Ryakhov R.V., Shchhavelev A.N. Greenhouse gases regional distribution depending on landscape and geographical features based on space survey materials (Chechen Republic as the example). *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025. Vol. 69. No. 4. pp. 45–58. DOI: 10.30533/GiA-2025-046. (In Russ.)
10. Myachina K.V. Analysis of satellite images with NDVI calculation for studying the dynamics of the landscape cover of the territory of an oil field in the Orenburg region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2013. No. 4(42). pp. 206–209. (In Russ.)
11. Tronin A.A., Kiselyov A.V., Vasiliev M.P., Sedeeva M.S., Nerobelov G.M. Monitoring NO₂ content in the atmosphere of Russia using satellite data during COVID-19 pandemic. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021. Vol. 18. No. 3. pp. 309–313. (In Russ.)
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., House J.I. Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 2014. pp. 465–570.
13. 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.
14. 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.
15. Lewis S.L., Maslin M.A. Defining the Anthropocene. *Nature*. 2015. Vol. 519(7542). pp. 171–80. DOI: 10.1038/nature14258.
16. Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T. et al. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 6. No. 12. pp. 5225–5246.
17. Soden B.J., Held I.M. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19. No. 14. pp. 3354–3360.
18. Soderlund R., Svensson B.H. The global nitrogen cycle. *Ecological Bulletins*. 1976. pp. 23–73.
19. Solomon S., Daniel J.S., Neely III R.R., Vernier J.P., Dutton E.G., Thomason L.W. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*. 2011. Vol. 333. No. 6044. pp. 866–870.
20. Sun Z., Zhan D., Jin F. Spatio-temporal characteristics and geographical determinants of air quality in cities at the prefecture level and above in China. *Chinese Geographical Science*. 2019. Vol. 29. No.2. pp. 316–324.
21. Zhao Y., Zhang X., Chen M., Gao S., Li R. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors. *Journal of Geographical Sciences*. 2022. Vol. 32 No. 5. pp. 853–872.