



УДК 911.9:528.8(470.56)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.84>

Особенности пространственного распределения диоксида углерода в воздухе степной зоны (Оренбургская область, Волго-Уральский регион)

К. В. Мячина, А. Н. Щавелев, Р. В. Ряхов, Р. М. Безбородникова*

Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, Россия

Аннотация. Обосновывается актуальность мониторинга климаторегулирующих характеристик степных экосистем, включая концентрацию диоксида углерода в атмосфере. Выявляются особенности пространственного распределения атмосферного диоксида углерода в приуральской части Волго-Уральского степного региона (Оренбургская область), анализируется связь между содержанием диоксида углерода в воздухе с метеорологическими характеристиками. Для исследований выделена репрезентативная сеть из 107 ключевых участков, включающая подзоны луговой, типчаково-ковыльно-разнотравной и типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи. В ходе полевых исследований на участках выполнялись замеры концентрации диоксида углерода в воздухе на высоте 1,5–2 м, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, температуры и влажности почвы. В воздушной смеси на участках исследований зафиксированы концентрации диоксида углерода в диапазоне от 0,035 до 0,065 % объемных. Выявлено, что показатель содержания диоксида углерода в исследуемом слое воздуха имеет обратную зависимость от температуры воздуха и прямую зависимость от его влажности. Отмечено формирование нескольких территориальных кластеров с близкими значениями искомого показателя. Предполагается, что особенности пространственного распределения диоксида углерода в воздухе степного региона связаны в первую очередь со специфичными характеристиками степных подзон и не выказывают зависимости от локальных ландшафтных характеристик ключевых участков.

Ключевые слова: диоксид углерода, содержание в воздухе, пространственное распределение, автокорреляция признака, кластеры, метеорологические характеристики, ландшафты, степные подзоны, приуральская часть Волго-Уральского степного региона.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гос. задания Института степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1

Для цитирования: Особенности пространственного распределения диоксида углерода в воздухе степной зоны (Оренбургская область, Волго-Уральский регион) / К. В. Мячина, А. Н. Щавелев, Р. В. Ряхов, Р. М. Безбородникова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 84–96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.84>

Features of the spatial Distribution of Carbon Dioxide in the Atmosphere of the Steppe Landscapes (Orenburg Region, Volga-Ural Region)

K. V. Myachina, A. N. Shchavelev, R. V. Ryakhov, R. M. Bezborodnikova*

Steppe Institute UrB RAS, Orenburg, Russian Federation

Abstract. The Russian steppes play a certain role in absorbing atmospheric carbon and maintaining biospheric regulation, and therefore monitoring the climate-regulating characteristics of steppe ecosystems is relevant, including the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. The objectives of the study are to identify the features of the atmospheric carbon dioxide spatial distribution in the Ural part of the Volga-Ural steppe region (Orenburg region) and to analyze the relationship between the carbon dioxide content in the air and meteorological characteristics. A representative network of 107 key sites has been identified for research, including the subzones of the meadow steppe, fescue-feather grass forb steppes, and poor herb fescue-feather grass steppes. During field work, measurements of atmospheric carbon dioxide concentration at an altitude of 1.5–2 m, air temperature and humidity, wind speed, soil temperature and humidity were carried out at each site. The following results were obtained: carbon dioxide concentrations ranging from 0.035 to 0.065% by volume were recorded in the air mixture at the study sites. It was revealed that the index of carbon dioxide content in the studied air layer has an inverse dependence on air temperature and a direct dependence on its humidity. The formation of several territorial clusters with similar values of the desired indicator was noted in the study region. Clusters with both low and high levels of atmospheric carbon dioxide are distinguished in the zones of the fescue-feather grass forb steppes and poor herb fescue-feather grass steppes. Clusters with high values of atmospheric carbon dioxide were found in the subzones of the poor herb fescue-feather grass steppes and meadow steppe. It is assumed that the features of the spatial distribution of carbon dioxide in the air of the steppe region are mainly related to the specifics of the characteristics of steppe subzones and do not show dependence on the local landscape characteristics of key sites.

Keywords: carbon dioxide, atmospheric content, spatial distribution, autocorrelation of the feature, clusters, meteorological characteristics, landscapes, steppe subzones, the Ural part of the Volga-Ural steppe region.

For citation: Myachina K.V., Shchavelev A.N., Ryakhov R.V., Bezborodnikova R.M. Features of the spatial Distribution of Carbon Dioxide in the Atmosphere of the Steppe Landscapes (Orenburg Region, Volga-Ural Region). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 53, pp. 84-96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.84>(in Russian)

Актуальность

Повышение температуры приземного слоя воздуха напрямую связано с увеличением содержания в экосистеме парниковых газов: количество поглощенной ими и, следовательно, переизлучаемой тепловой радиации в направлении земной поверхности увеличивается [Глаголев, Шнырев, 2007; Федоров, Сухоруков, Трубник, 2021], приводя к формированию разномасштабных климатических трансформаций, играющих роль в глобальном изменении климата. Соответственно, анализ динамики содержания основных парниковых газов в атмосфере и связанных климатических переменных на определенных территориях приобретает все большую мировую актуальность и является одним из подходов к решению современных эколого-климатических задач.

Параметры растительного покрова – естественного инструмента улавливания углерода из атмосферы – значительно варьируются в зависимости от широтно-зональных условий местности и локальных особенностей микроклимата. Соответственно, варьируется и концентрация диоксида углерода в воздухе. Безусловно, основным поглотителем углерода из атмосферы являются леса. Однако в ходе старения лесов происходит изменение их роли в поддержании углеродного баланса: поглотительная способность возрастных лесов снижается при стабилизации или снижении валовой первичной продуктивности [Kira, Shidei, 1967; Steeper ... , 2014]. В то же время российские степи, как и аналоговые территории на других континентах, играют определенную роль в улавливании углерода и поддержании биосферной регуляции, в связи с чем актуален мониторинг состояния климаторегулирующих параметров экосистем, включая концентрацию диоксида углерода в атмосфере [Smelansky, Tishkov, 2012; Dynamics ... , 2021].

Основные задачи исследования:

- оценить особенности пространственного распределения диоксида углерода в воздухе степного региона,
- выявить связь содержания диоксида углерода в воздухе на ключевых участках с локальными метеорологическими характеристиками.

Объекты и методы

Территория исследования – часть Оренбургской области, расположенная в приуральской зоне Волго-Уральского степного региона. Представленное здесь разнообразие типов степной растительности и почв обеспечивает научную репрезентативность исследования. Так, в изучаемой части Оренбургской области представлены подзоны луговой, типчаково-ковыльно-разнотравной и типчаково-ковыльной степи [Географический ... , 1999]. Кроме того, Оренбургская область играет ведущую роль в добыче углеводородного сырья в степной зоне Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, демонстрируя кумулятивные эффекты воздействия нефтегазодобычи [Мячина, 2013]. Наблюдаемые в ходе разработки нефтегазовых месторождений изменения исходных характеристик степных ландшафтов могут влиять на распределение диоксида углерода в воздухе.

В границах изучаемой территории заложена сеть из 107 ключевых участков для проведения полевых исследований. Участки охватывают три степные подзоны (рис. 1) и неравномерно распределены в 4 группы следующим образом: в северо-западной группе выделено 46 участков (43 % от их общего количества), в северо-восточной группе – 21 участок (19,6 %), в юго-восточной и юго-западной группах – по 20 участков (по 18,7 % соответственно).

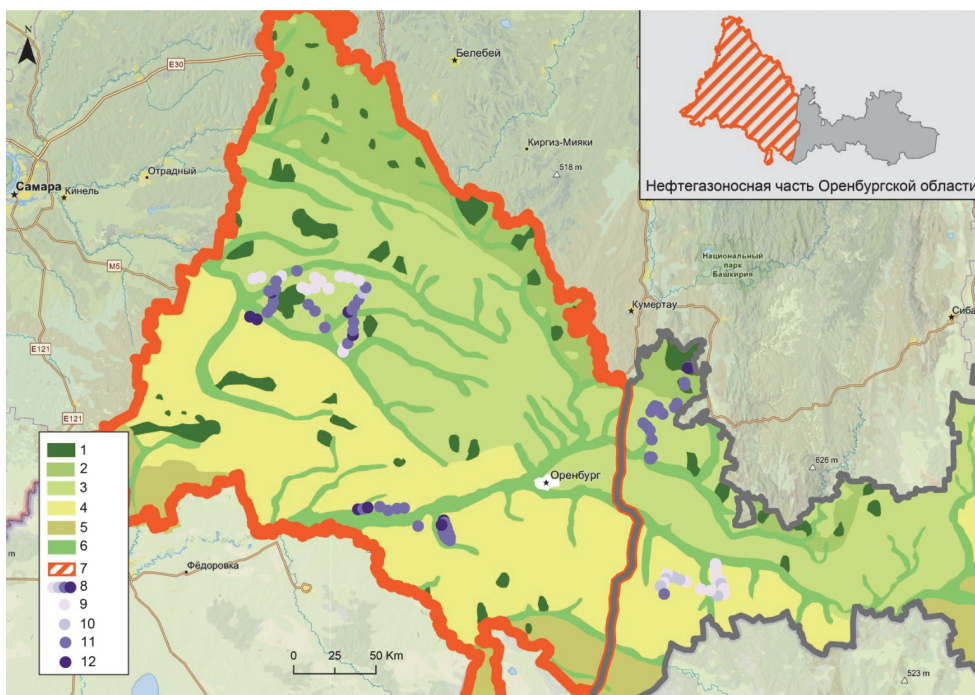


Рис. 1. Сеть ключевых участков исследования на территории Оренбургской области: 1 – облесенные территории, 2 – луговые степи, 3 – типчаково-ковыльно-разнотравные степи, 4 – типчаково-ковыльно-бедноразнотравные степи, 5 – дерновинно-злаковые типчаково-ковыльные степи, 6 – пойменные леса и луга, 7 – нефтегазоносная часть Оренбургской области, 8 – ключевые участки исследования, в том числе: 9 – ключевые участки с низкой для участков исследования приземной концентрацией диоксида углерода ($< 0,035$ % об.), 10 – ключевые участки со средней приземной концентрацией диоксида углерода $[0,035; 0,04]$ % об., 11 – ключевые участки с высокой приземной концентрацией диоксида углерода $[0,04; 0,045]$ % об., 12 – ключевые участки с максимальной для участков исследования приземной концентрацией диоксида углерода $(0,045; 0,065)$ % об.

В первую очередь в ходе полевого сезона 2024 г. на ключевых участках выполнялись замеры приземной (на высоте 1,5 м) концентрации диоксида углерода в воздухе с помощью полевого газоанализатора. Измерения проводились в дневные часы в связи с тем, что в это время суток возникает наиболее активная фаза фотоассимиляции CO_2 [Временная ... , 2025].

Параллельно замерялись такие метеопараметры (далее – признаки), как температура воздуха, температура и влажность почвы, скорость ветра. В качестве дополнительных признаков для последующего математического анализа связи концентрации CO_2 с перечисленными внешними факторами выступали количество дней от начала года и количество времени от начала суток на момент замера.

Кроме того, необходимо было понять влияние на распределение концентрации CO_2 такого фактора, как горизонтальный воздушный массоперенос, сопряженный со скоростью и направлением ветра. В регионе исследования в летний период преобладают восточное и западное направления ветра

со средней скоростью 4 м/с [Географический ... , 1999]. Однако в период выполнения полевых работ (пять дней непрерывно) наблюдались все определяемые направления ветра, за исключением северо-восточного. Помимо разнообразия направлений ветра, необходимо отметить их частую смену: ветер менялся 2–3 раза в сутки, а его скорость колебалась в значениях от 0–1 м/с (штиль) до 4–5 м/с с порывами до 8 м/с. Такие особенности ветрового режима, характерные для степной зоны, позволяют предположить, что в период исследования не осуществлялось доминирующего значимого горизонтального переноса диоксида углерода в атмосфере изучаемой территории. Тем не менее, вероятно, существует постоянное относительно равномерное турбулентное (больше – горизонтальное) перемешивание в атмосфере, позволяющее выровнять содержание газов в воздухе. Поскольку коэффициент рельефа местности в регионе исследования равен 1 (т. е. перепад высот не превышает 50 м на 1 км), можно считать, что и вертикальные потоки CO₂ не покажут существенной пространственной изменчивости, поскольку обусловлены, как правило, неоднородным рельефом [Modeling ... , 2024; Влияние ... , 2025].

Параллельно с маршрутными исследованиями на одном из ключевых участков с помощью полевой метеостанции в течение нескольких суток в июне 2024 г. в непрерывном режиме фиксировались основные метеопараметры и концентрация диоксида углерода.

Вторым шагом с помощью ГИС по результатам выполненных замеров проанализирована неоднородность распределения концентрации CO₂ на территории исследования и выявлена пространственная автокорреляция признаков. Для этого рассчитывался глобальный индекс Морана по формуле (1) [Грекусис, 2021; Чудинова, 2021]:

$$I = \frac{n}{W} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (1)$$

где Y_i , Y_j – атрибутивные признаки объектов i и j соответственно; w_{ij} – пространственный вес для пары объектов i и j ; n – общее число объектов; W – сумма весов.

Значение индекса Морана зависит от выбора используемых пространственных весов [Chen, 2013]. Поскольку набор данных содержит точечные местоположения, в расчетах использовалась матрица обратных расстояний, пространственные веса которой определяются по формуле (2) следующим образом:

$$W_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i = j \\ \frac{1}{d_{ij}}, & \text{если } i \neq j \end{cases}, \quad (2)$$

где W_{ij} – элемент матрицы пространственных весов для регионов i и j ; d_{ij} – расстояние от региона i до региона j .

Соответственно, чем дальше точка i находится от точки j , тем меньшему влиянию точки j она подвержена. При этом расстояния d_{ij} рассчитывались в многомерной плоскости всех анализируемых переменных, и вместо использования евклидова расстояния для десятичных градусов применялось дуговое расстояние, поскольку географический слой данных предоставлялся в десятичных градусах широты-долготы без проецирования координат.

Для проверки гипотезы о том, что пространственное распределение диоксида углерода в исследуемом слое воздуха коррелирует с пространственным распределением других признаков (измеренных метеопараметров и даты/времени замеров), были рассчитаны двухфакторные индексы Морана.

Далее для оценки пространственной автокорреляции на локальном уровне использовались локальные метрики пространственной автокорреляции: локальный индекс Морана (I^*) и статистика Гетиса – Орда (G^*) [Getis, Ord, 1992].

И, наконец, с помощью регрессионного анализа выявлялась связь содержания диоксида углерода в воздухе с определяемыми метеопараметрами.

Результаты

Большая часть зафиксированных на ключевых участках значений CO_2 находится в интервале от 0,040 до 0,045 % объемных (см. рис. 1). Согласно диаграмме размаха (рис. 2), пространственное распределение концентраций CO_2 имеет одно экстремальное значение.

Экстремальное значение CO_2 зафиксировано на ключевом участке, представляющем собой экотон – границу луговой степи и лесного массива в лесостепной подзоне северной части Оренбургской области.

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния индекса Морана, где по оси абсцисс отложено значение CO_2 в каждой измеряемой точке, по оси ординат – его пространственный лаг, представляющий собой средневзвешенное значение по всем соседям. Значение индекса Морана, равное 0,488, указывает на положительную значительную автокорреляцию: т. е. существует закономерность пространственного распределения концентрации CO_2 в изучаемой части Оренбургской области [Metropolis, Ulam, 1949; A modified ... , 2010].

Уровень значимости индекса Морана зависит от числа подсчетов при перестановках. Учитывая z -оценку, равную 8,21, и уровень значимости p , равный 0,001, полученный при 999 перестановках, индекс Морана значим и не является результатом пространственной случайности, т. е. пространственное распределение CO_2 имеет тенденцию к группировке. При

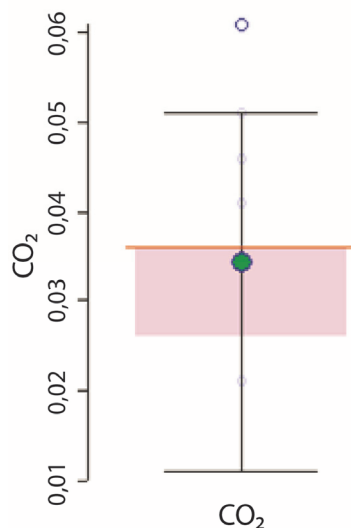


Рис. 2. Диаграмма размаха значений концентрации CO_2 в атмосфере региона

этом близлежащие друг к другу ключевые участки исследования имеют схожие значения таких метеорологических показателей, как скорость ветра, температура воздуха и температура почвы. Результаты расчетов двухфакторных индексов Морана, представленные в таблице, показывают, что для трех вышеперечисленных признаков существует пространственная автокорреляция CO_2 на уровне значимости 0,05. При этом дата и время замеров оказались незначимы.

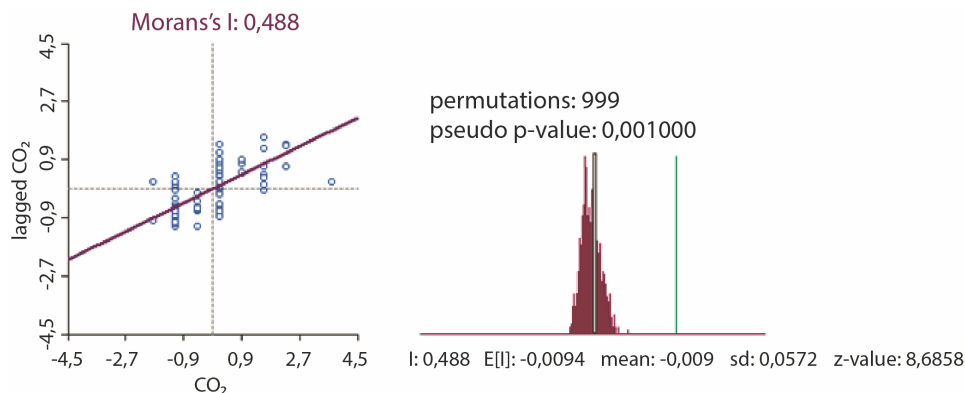


Рис. 3. Диаграмма рассеяния индекса Морана (I) и результат применения метода Монте-Карло для получения распределения с 999 перестановками

Таблица

Двухфакторные индексы Морана

Название показателя	Обозначение	Двухфакторный индекс Морана	z-value	p-value
Скорость ветра	wind	0,108	2,37	0,005
Температура воздуха	air temp	0,078	2,02	0,022
Температура почвы	soil temp	0,074	1,95	0,029
Влажность почвы	soil mois	-0,011	-0,26	0,382
Количество дней от начала года	Days	0,045	1,18	0,1116
Количество времени от начала суток	Time	-0,022	-0,56	0,282

Локальные метрики пространственной автокорреляции (локальный индекс Морана и статистика Гетиса – Орда) позволили выполнить оценку пространственной автокорреляции измеренных значений диоксида углерода на локальном уровне [Lee, Li, 2017; Griffith, 2009]. Если участки группировались в кластер, то он отмечался как «высокий-высокий» (имеется в виду показатель признака) в случае статистически значимых кластеров с высоким уровнем CO_2 и как «низкий-низкий» в случае статистически значимых кластеров с низким уровнем CO_2 . Если ключевой участок отличается высоким значением CO_2 , но окружен участками с низкими значениями CO_2 , то кластер отмечался как «высокий-низкий». Если же на участке отмечено низкое значение CO_2 , но он окружен участками с высокими значениями, то кластер отмечался как «низкий-высокий» (рис. 4). Незначимые результаты свидетельствуют о том, что в соответствующих точках не отмечено признаков кластеризации.

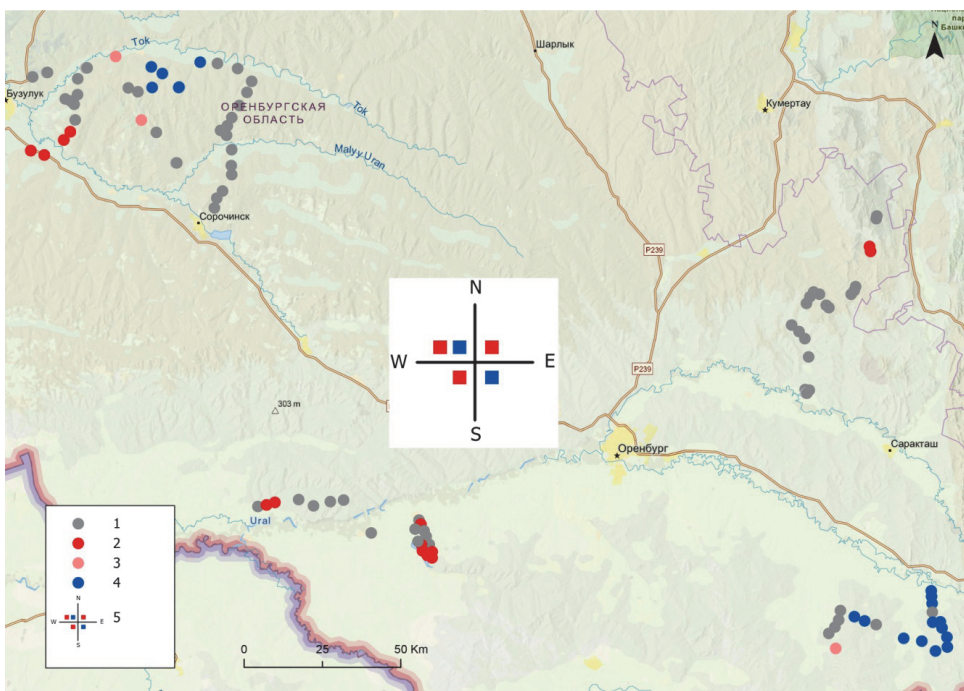


Рис. 4. Пространственная кластеризация значений атмосферного диоксида углерода в регионе исследования: 1 – автокорреляция признака не выявлена (или незначима), 2 – автокорреляция признака «высокий-высокий», 3 – автокорреляция признака «высокий-низкий», 4 – автокорреляция признака «низкий-низкий», 5 – схема группировки выявленных кластеров

И, наконец, регрессионный анализ позволил выявить связь между зафиксированными метеопараметрами и концентрацией CO_2 . Наиболее существенное влияние на атмосферную концентрацию углекислого газа в вегетационный период оказывают температура воздуха (обратная зависимость) и относительная влажность воздуха (прямая зависимость) (рис. 5).

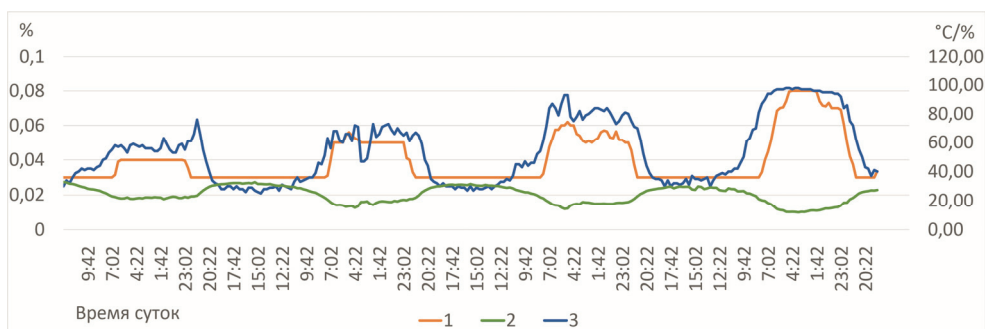


Рис. 5. Графики одновременной суточной динамики концентрации диоксида углерода в воздухе ключевого участка (1), температуры воздуха (2) и относительной влажности воздуха (3), где по левой оси ординат отложены значения концентрации диоксида углерода в воздухе (% объемных), по правой оси ординат отложены температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и его влажность (%)

Обсуждение

На рис. 4 можно увидеть, что наблюдается положительная пространственная автокорреляция и статистически значимая кластеризация ключевых участков с низкими значениями CO_2 в западной и юго-восточной группах, т. е. в типчаково-ковыльно-разнотравной и типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи соответственно. Одновременно с этим в западной группе (типчаково-ковыльно-разнотравная степь) отмечается и статистически значимая кластеризация участков с высокими значениями CO_2 . Кластеризация по высоким значениям диоксида углерода наблюдается также в южной и незначительно в северо-восточной группах ключевых участков (подзоны типчаково-ковыльно-бедноразнотравной и луговой степи соответственно).

Статистически значимая кластеризация высоких значений CO_2 на юге, западе и востоке Оренбургской области существует локализовано и, судя по всему, мало связана с ландшафтными характеристиками. Например, в северо-западном кластере «высокий-высокий» автокорреляция признака (содержание CO_2 в воздушной смеси на высоте 1,5–2 м от земной поверхности) отмечается на шести ключевых участках с абсолютно разными характеристиками: ковыльная залежь (2 участка), пашня без всходов, пашня со всходами, пастбище, разнотравье на опушке березового колка. В северо-западном кластере «низкий-низкий», состоящем из шести ключевых участков, наблюдается такое же разнообразие их ландшафтных характеристик: пашня со всходами (2 участка), пашня без всходов, площадка нефтедобывающей скважины, разнотравно-ковыльная залежь, разнотравно-ковыльно-типчаковая залежь. В юго-восточном кластере, включившем 14 ключевых участков с автокорреляцией признака «низкий-низкий», они также обнаруживают широкое разнообразие исходных параметров: злаковое разнотравье (3 участка), полынно-типчаковое разнотравье (2 участка), пашня со всходами, солончак (3 участка), сухая полынно-типчаковая степь, облесенное разнотравье (4 участка). Юго-западный кластер, охватывающий 8 участков с автокорреляцией признака «высокий-высокий», аналогично не отличается однообразием их параметров. Здесь в кластер вошли пашни со всходами подсолнуха и ржи (3 участка), заброшенная пашня с неубранным высохшим подсолнечником, участки с разнотравьем, полынным разнотравьем и злаковым разнотравьем (2 участка). Лишь один мелкий кластер на северо-востоке исследуемой территории, образованный двумя участками с автокорреляцией «высокий-высокий», демонстрирует сходство их характеристик: оба участка являются переходной зоной, находясь на границе луговой степи и горно-лесного массива лесостепного заповедника Оренбургской области.

На большей части ключевых участков (более 66 %) результаты замеров диоксида углерода не показали наличия автокорреляции и склонности к кластеризации (см. рис. 4). Самая большая доля кластеризующихся участков отмечена в юго-восточной части региона исследования – 70 % от общего количества юго-восточных участков (типчаково-ковыльно-бедноразнотравные степи). На втором и третьем месте – юго-западная и северо-западная части региона (кластеризуются 40 и 21 % всех ключевых участков, расположенных в типчаково-ковыльно-бедноразнотравной и типчаково-ковыльно-

разнотравной степи соответственно). Минимальное количество автокорреляций признака, т. е. минимальная доля кластеризующихся участков, зафиксировано в северо-восточной части региона – 9,5 % от общего количества участков северо-восточной группы (луговые и типчаково-ковыльно-разнотравные степи).

Полученные результаты позволяют предположить, что пространственное распределение диоксида углерода в воздухе степного региона зависит по большей части от характеристик степной подзоны и почти не зависит от локальных ландшафтных характеристик ключевых участков, включая техногенно-нарушенные нефтегазодобычей территории. Наиболее однородными значениями концентрации атмосферного диоксида углерода характеризуется подзона типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи, в то время как разнотравно-типчаково-ковыльные и дерновинно-злаковые типчаково-ковыльные степи показывают низкую степень автокорреляции этого признака. Низкая значимость локальных ландшафтных характеристик объясняется, по всей видимости, ролью воздушного массопереноса, которому на степной равнинной территории не препятствуют серьезные географические барьеры (лесные массивы с высокорослыми деревьями, высокая пересеченность рельефа, густая гидрографическая сеть с полноводными реками, крупные региональные литогеохимические барьеры и пр.). Максимальная доля ключевых участков с низкими показателями атмосферного углерода – 65 % от их общего количества – также отмечается в подзоне типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи в юго-восточной части региона (см. рис. 1). Доля ключевых участков с максимальными значениями атмосферного диоксида углерода не превышает 20 % во всех частях региона. При этом в северо-восточной части региона (луговые и типчаково-ковыльно-разнотравные степи) зафиксированы лишь высокие и максимальные концентрации диоксида углерода в воздухе (см. рис. 1).

Представленный на рис. 5 график позволяет утверждать, что концентрация диоксида углерода в воздухе степной зоны имеет обратную зависимость от температуры воздуха и прямую зависимость от его влажности. Такая корреляция в некотором роде объясняет более высокую концентрацию CO_2 в воздухе луговых и типчаково-ковыльно-разнотравных степей относительно типчаково-ковыльно-бедноразнотравной сухой степи в юго-восточной части региона.

Заключение

Результаты замеров диоксида углерода на большей части ключевых участков (более 66 %) не показали наличия каких-либо закономерностей его распределения в степном регионе, что можно объяснить преобладанием ветреных дней с различными направлениями ветра и их частой сменой. Лишь около 40 % ключевых участков исследования объединяются в несколько географически приуроченных кластеров с близкими значениями показателя атмосферного диоксида углерода. В зонах типчаково-ковыльно-разнотравной и типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи преимущественно отмечаются кластеры с низкими показателями атмосферного диоксида углерода. Кла-

стеры с высокими значениями атмосферного диоксида углерода выделяются в подзоне луговой степи и в меньшей степени в типчаково-ковыльно-бедноразнотравной степи. Судя по всему, пространственное распределение диоксида углерода в воздухе степного региона в некоторой степени зависит от природных характеристик степной подзоны и почти не зависит от локальных ландшафтных характеристик ключевых участков, включая техногенно-нарушенные нефтегазодобычей территории.

Список литературы

Влияние пространственной неоднородности подстилающей поверхности на потоки парниковых газов / Ю. В. Мухартова, Р. Р. Гибадуллин, А. В. Ольчев [и др.] // Карбоновые полигоны мониторинг геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С. К. Гулева, А. В. Ольчева. М. : Науч. мир, 2025. С. 398–404.

Временная изменчивость приземных концентраций парниковых газов и результаты восстановления полей концентраций по данным измерений на полигоне «Урал-карбон» в Свердловской области / Ю. И. Маркелов, К. Л. Антонов, В. А. Поддубный [и др.] // Карбоновые полигоны мониторинг геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С. К. Гулева, А. В. Ольчева. М. : Науч. мир, 2025. С. 130–140.

Географический атлас Оренбургской области / А. А. Чибилев, В. П. Петрищев, А. И. Климентьев [и др.] / [науч. ред. и сост. А. А. Чибилев]. М. : ДИК ; Оренбург : Оренбург. кн. изд-во, 1999. 95 с.

Глаголев М. В., Шнырев Н. А. Динамика летне-осенней эмиссии CH₄ естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник МГУ. 2007. №1. С. 8–14.

Грекусис Д. Методы и практика пространственного анализа. Описание, исследование и объяснение с использованием ГИС / [пер. с англ. А. Н. Киселева]. М. : ДМК Пресс, 2021. 540 с.

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.

Федоров Ю. А., Сухоруков В. В., Трубник Р. Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. № 1. С. 6–34.

Чудинова О. С. Применение методов пространственного анализа данных для исследования региональных особенностей дифференциации доходов населения России // Развитие и взаимодействие реального и финансового секторов экономики в условиях цифровой трансформации: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург, 24–25 нояб. 2021 г. Оренбург : Оренбург. гос. ун-т, 2021. С. 562–568.

A modified version of Moran's I / M. C. Jackson, L. Huang., Q. Xie [et al.] // International journal of health geographics. 2010. Vol. 9. P. 1–10.

Chen Y. New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation // PloS one. 2013. Vol. 8, N 7. P. e68336.

Dynamics of soil organic carbon in the steppes of Russia and Kazakhstan under past and future climate and land use / S. Rolinski, A. V. Prishchepov, G. Guggenberger [et al.] // Regional Environmental Change. 2021. Vol. 21. P. 1–16.

Getis A., Ord J. K. The analysis of spatial association by use of distance statistics // Geographical analysis. 1992. Vol. 24, N 3. P. 189–206.

Griffith D. A. Spatial autocorrelation // International encyclopedia of human geography. 2009. Vol. 2009. P. 308–316.

Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific // Jap J Ecol. 1967. N 17. P. 70–87.

Lee J., Li S. Extending Moran's index for measuring spatiotemporal clustering of geographic events // Geographical Analysis. 2017. Vol. 49, N 1. P. 36–57.

Metropolis N., Ulam S. The monte carlo method // Journal of the American statistical association. 1949. Vol. 44, N 247. P. 335–341.

Modeling the Spatial Variability of the Wind Field and CO₂ and CH₄ Fluxes over a Heterogeneous Surface / R. R. Gibadullin, I. V. Mukhartova, M. V. Kochkina [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. 2024. Vol. 49, N 9. P. 828–833.

Smelansky I. E., Tishkov A. A. The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges // Eurasian steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world. Dordrecht : Springer Netherlands. 2012. P. 45–101.

Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth / J. Tang, S. Luysaert, A. D. Richardson [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111, N 24. P. 8856–8860.

References

Muhartova Ju.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V. et al. Vliyanie prostranstvennoj neodnorodnosti podstilajushhej poverhnosti na potoki parnikovyh gazov [The influence of spatial heterogeneity of the underlying surface on greenhouse gas fluxes]. *Sbornik "Karbonovye poligony monitoring geoinformacionnye sistemy, sekvestracionnye tehnologii"* [Proceedings "Carbon polygons monitoring geoinformation systems, sequestration technologies"]. Ed. by S.K. Gulev and A.V. Olchev. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2025, pp. 130-140. (in Russian)

Markelov Ju.I., Antonov K.L., Poddubnyj V.A. et al. Vremennaja izmenchivost' prizemnyh koncentracij parnikovyh gazov i rezultaty vosstanovlenija polej koncentracij po dannym izmerenij na poligone "Ural-karbon" v Sverdlovskoj oblasti [Temporal variability of ground concentrations of greenhouse gases and the results of concentration field reconstruction based on measurement data at the Ural-carbon test site in the Sverdlovsk region]. *Karbonovye poligony monitoring geoinformacionnye sistemy, sekvestracionnye tehnologii* [Carbon polygons monitoring geoinformation systems, sequestration technologies]. Ed. by S.K. Gulev and A.V. Olchev. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2025, pp. 130-140. (in Russian)

Chibiljov A.A., Petrishhev V.P., Kliment'ev A.I. et al. *Geograficheskij atlas Orenburgskoj oblasti* [Geographical atlas of the Orenburg region]. Ed. by A.A. Chibiljov. Moscow, DIK Publ., Orenburg, Orenburg Publ., 1999, 95 p. (in Russian)

Glagolev M.V., Shnyrev N.A. Dinamika letne-osennej jemissii SN4 estestvennymi bolotami (na primere juga Tomskoj oblasti) [Dynamics of summer-autumn CH₄ emissions from natural swamps (using the example of the south of the Tomsk region)]. *Vestnik MGU* [Bulletin of Moscow State University], 2007, no. 1, pp. 8-14. (in Russian)

Grekusis D. *Metody i praktika prostranstvennogo analiza. Opisanie, issledovanie i ob#jasnenie s ispol'zovaniem GIS* [Spatial econometrics methods and evaluation of the effectiveness of government programs]. Transl. from engl. by A.N. Kiseleva. Moscow, DMK Press Publ., 2021, 540 p. (in Russian)

Myachina K.V. Analiz kosmicheskikh izobrazhenij s raschetom NDVI dlya izucheniya dinamiki landshaftnogo pokrova territorii nefryanogo mestorozhdeniya v Orenburgskoj oblasti [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]. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2013, no. 4 (42), pp. 206-209. (in Russian)

Fedorov Ju.A., Suhorukov V.V., Trubnik R.G. Analiticheskij obzor: jemissija i pogloshhenie parnikovyh gazov pochvami. Jekologicheskie problem [Analytical review: greenhouse gas emissions and uptake by soils. Environmental issues]. *Antropogennaja transformacija prirodnoj sredy* [Anthropogenic transformation of the natural environment], 2021, no. 1, pp. 6-34. (in Russian)

Chudinova O.S. Primenenie metodov prostranstvennogo analiza dannyh dlja issledovanija regional'nyh osobennostej differenciacii dohodov naselenija Rossii [The use of spatial data analysis methods to study the regional features of income differentiation in Russia]. *Razvitie i vzaimodejstvie realnogo i finansovogo sektorov jekonomiki v uslovijah cifrovoj transformacii* [Development and interaction of the real and financial sectors of the economy in the context of digital transformation]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Orenburg, 2021, pp. 562-568. (in Russian)

Jackson M.C., Huang L., Xie Q. et al. A modified version of Moran's I. *International journal of health geographics*, 2010, vol. 9. pp. 1-10.

Chen Y. New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation. *PloS one*, 2013. vol. 8. no. 7. pp. e68336.

Rolinski S., Prishchepov A.V., Guggenberger G. et al. Dynamics of soil organic carbon in the steppes of Russia and Kazakhstan under past and future climate and land use. *Regional Environmental Change*, 2021, vol. 21, pp. 1-16.].

Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24. no. 3. pp. 189-206.

Gibadullin R.R., Mukhartova I.V., Kochkina M.V. et al. Modeling the Spatial Variability of the Wind Field and CO₂ and CH₄ Fluxes over a Heterogeneous Surface. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, vol. 49, no. 9, pp. 828-833.

Griffith D. A. Spatial autocorrelation. *International encyclopedia of human geography*, 2009, vol. 2009, pp. 308-316.

Kira T., Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Jap. J. Ecol.*, 1967, no. 17, pp. 70-87.

Lee J., Li S. Extending Moran's index for measuring spatiotemporal clustering of geographic events. *Geographical Analysis*, 2017, vol. 49, no. 1, pp. 36-57.

Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo method. *Journal of the American statistical association*, 1949, vol. 44, no. 247, pp. 335-341.

Smelansky I.E., Tishkov A.A. The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges. Eurasian steppes. In *Ecological problems and livelihoods in a changing world*. Dordrecht, Springer Netherlands, 2012, pp. 45-101.

Tang J., Luyssaert S., Richardson A.D. et al. 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.

Сведения об авторах

Мячина Ксения Викторовна

доктор географических наук,
ведущий научный сотрудник, заведующий
отделом природно-техногенных геосистем
Институт степи УрО РАН
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11
e-mail: mavicsen@list.ru

Щавелев Антон Николаевич

младший научный сотрудник
Институт степи УрО РАН
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11
e-mail: ditmark12rus@gmail.com

Ряхов Роман Васильевич

научный сотрудник
Институт степи УрО РАН
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11
e-mail: remus.rv@gmail.com

Безбородникова Роза Минулловна

кандидат экономических наук,
младший научный сотрудник
Институт степи УрО РАН
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11
e-mail: fiz.mme.rosa@rambler.ru

Information about the authors

Myachina Ksenia Viktorovna

Doctor of Sciences (Geography),
Leading Research Scientist, Head of Natural-
Technogenic Geosystems Department
Institute of Steppe UB RAS
11, Pionerskaya st., Orenburg, 460000,
Russian Federation
e-mail: mavicsen@list.ru

Shchavalev Anton Nikolaevich

Junior Research Scientist
Institute of Steppe UB RAS
11, Pionerskaya st., Orenburg, 460000,
Russian Federation
e-mail: ditmark12rus@gmail.com

Ryakhov Roman Vasilyevich

Research Scientist
Institute of Steppe UB RAS
11, Pionerskaya st., Orenburg, 460000,
Russian Federation
e-mail: remus.rv@gmail.com

Bezborodnikova Rosa Minullova

Candidate of Sciences (Economic)
Junior Research Scientist
Institute of Steppe UB RAS
11, Pionerskaya st., Orenburg, 460000,
Russian Federation
e-mail: fiz.mme.rosa@rambler.ru

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 29.08.2025; принята к публикации 10.09.2025

The article was submitted March, 24, 2025; approved after reviewing August, 29, 2025; accepted for publication September, 10, 2025