УДК 574 DOI: 10.23885/2500-395X-2023-1-8-10-16

ОЦЕНКИ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В СТЕПНЫХ ЗАЛЕЖАХ РОССИИ

Л.Л. Голубятников[1], И.Н. Курганова[2], В.О. Лопес де Гереню[2]

[1] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва
[2] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино
golub@ifaran.ru, ikurg@mail.ru, vlopes@mail.ru

Аннотация. На степных залежах (заброшенных пахотных землях) происходит восстановление природных степных экосистем. В результате этого процесса изменяются параметры углеродного цикла этих экосистем, в частности, возрастают продуктивность и фитомасса растительного покрова, происходит накопление углерода в почвенном слое.

Площади залежных степных экосистем на территории России рассчитаны на основе данных статистических отчетов и бюллетеней федеральных служб Российской Федерации. Оценки первичной биологической продукции исследуемых экосистем получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием базы данных эмпирически измеренных значений этой величины. Оценки гетеротрофного почвенного дыхания залежей рассчитаны на основе регрессионной T&P-модели с учетом доли гетеротрофного дыхания в общем потоке диоксида углерода из почв травяных экосистем. Получена оценка углеродного баланса степных залежей России. Показано, что залежные экосистемы степного биома России являются существенным стоком атмосферного диоксида углерода. Средняя интенсивность депонирования углерода залежными степными экосистемами на территории России составляет (285 ± 159) гСм$^{-2}$год$^{-1}$. Степные залежи России ежегодно поглощают (50 ± 28) МтС.

Ключевые слова: залежные экосистемы, степной биом, поглощение атмосферного углерода, эмиссия диоксида углерода, углеродный баланс.

На территории России степи занимают около 1,7 млн км^2 и расположены в средних широтах между широко- или мелколиственными лесами и пустынями. Степной биом в России охватывает обширную территорию южной части Восточно-Европейской равнины, равнинные территории Предкавказья и Крыма (Европейский степной регион России), южные районы Западно-Сибирской равнины (Сибирский степной регион России), межгорные котловины северной части Центральной Азии (республик Бурятия, Хакассия, Тыва, Иркутской области, Забайкальского и Красноярского края) (Центрально-Азиатская степной регион России) [1]. Растительный покров степей сформирован в основном разнообразными травяными сообществами, доминантами в которых являются многолетние дерновинные злаки [2].

Степной биом России представлен луговыми, настоящими, сухими и опустыненными степями. Подзона луговых степей расположена вдоль южной границы лесной зоны. На территории России луговые степи образуют наиболее обширную по площади степную подзону. Экосистемы настоящих степей в России занимают значительные территории на юго-западе Европейской части России, в Азиатской части встречаются фрагментарно. Сухие степи распространены преимущественно в Ставропольском крае, республиках Крым, Дагестан, Тыва. Экосистемы опустыненных степей занимают значительную территорию на юго-востоке Европейской части России и представлены в межгорных котловинах центральной и южной Тывы (рис. 1).

Степные экосистемы функционируют при дефиците влаги, который нарастает от луговых степей к опустыненным. Для степной территории России характерно существенное изменение климатических показателей как в широтном, так и в долготном направлениях: значения среднегодовой приповерхностной температуры воздуха изменяются от –5,0 °С до +10,9 °С, значения годовых осадков варьируют от 237 мм/год до 769 мм/год. Наибольший размах значений температуры воздуха (8,4 °С) и годовых осадков (532 мм/год) наблюдается в степных экосистемах Европейского региона России. Количество атмосферных осадков теплого периода года в степных регионах России в 2,2–3,4 раза превосходит количество осадков холодного периода [1].

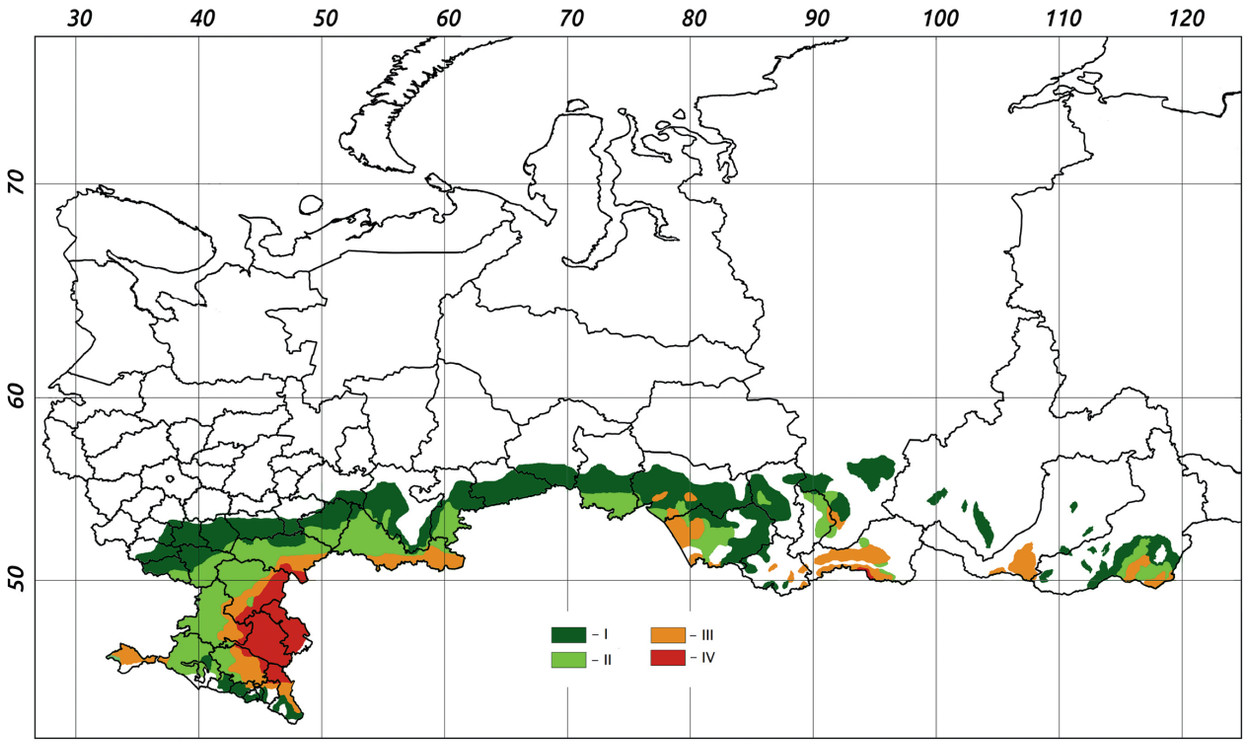


Рис. 1. Картосхема расположения степного биома на территории России. Типы степей: I – луговые, II – настоящие, III – сухие, IV – опустыненные

На значительной части степного биома сформировались почвы с высоким содержанием органического вещества – черноземы и каштановые. Значительная концентрация органического вещества в почвах степных экосистем (до 22,9–35,7 кг С/м^2 в метровом слое почвы) определяет как высокий уровень их плодородия, так и значительный вес в глобальном депонировании углерода. В результате того, что в степях сформировались высоко плодородные почвы, значительная часть территории степного биома распахана и используется для выращивания сельскохозяйственных культур. Нераспаханные степные площади используются в качестве пастбищ и сенокосов [3].

В природных экосистемах количество фитомассы, растительных остатков и органического вещества почвы остается в среднем постоянным [4]. Любые изменения в системе землепользования на определенной территории влияют на содержание и интенсивность потоков углерода в экосистемах этой территории. Перевод целинных земель в пахотные угодья приводит к снижению фитомассы и первичной биологической продукции растительного покрова, т.к. значения этих характеристик в агроэкосистемах ниже, чем в целинных экосистемах. Ежегодное изъятие растительного материала (в виде урожая), ранее служившего источником пополнения почвенного углерода, и изменение структуры почв при распашке, которая способствует усилению процессов минерализации органического вещества почвы, приводят к значительным потерям органического углерода экосистемами [4; 5]. В зависимости от климатических условий, степени и характера изменений в землепользовании через некоторое время после распашки устанавливается новый стационарный уровень содержания органического углерода в почвах [6; 7]. Потери органического углерода за период переходного режима могут составлять от 10 до 40 % от их начального запаса. Согласно работе [5], потери органического углерода из пахотных почв Западной Сибири за период с 1930 по 1990 г. составили 1,12 ГтС или 29 % их исходного запаса.

Часть распаханных территорий по разным причинам на определенных этапах развития земледелия прекращали обрабатывать. Заброшенные пахотные земли образуют залежи. Социально-экономические изменения в России в 1990-х гг. привели к значительному увеличению площади

залежных земель [8]. После прекращения распашки земель в степной зоне начался процесс восстановления природных степных экосистем на залежах. При благоприятных условиях восстановления за 15–30 лет в степных экосистемах формируется травянистый покров, который по видовому составу близок к степным сообществам, существовавшим до распашки [9].

На залежных экосистемах в процессе восстановления степного растительного покрова возрастают продуктивность и фитомасса как надземной, так и подземной его частей. Увеличивается количество поступающего в верхний почвенный горизонт органического вещества. В тоже время происходит обогащение органическим веществом более глубоких слоев почвы вследствие значительного увеличения количества почвенного детрита в экосистеме и более активного перемешивания растительных остатков почвенной фауной. Происходит постепенное восстановление естественных физико-химических свойств и микробиологических характеристик почв залежных экосистем [8; 10].

Согласно результатам исследования [11], при выведении пахотных почв России из сельскохозяйственного использования скорость аккумуляции углерода в бывшем пахотном слое (0–20 см) варьировала от 4,2 до 484 $гСм^{-2}год^{-1}$ в зависимости от типовой принадлежности почв и длительности периода восстановления, составляя в среднем (99 ± 14) $гСм^{-2}год^{-1}$. Общее накопление углерода в почвенном слое 0–20 см вследствие изменения землепользования в 1990–2004 гг. в России составило 184–673 МтС.

Климатические условия, почвенный покров, растительные сообщества, интенсивность антропогенного влияния определяют основные параметры углеродного цикла в степных залежных экосистемах, способность этих экосистем депонировать атмосферный углерод и продуцировать парниковые газы. Из всех типов наземных экосистем на территории России вклад степных залежных экосистем в биогенный круговорот углерода наименее изучен. В настоящей работе для залежных экосистем степного биома России получены оценки углеродного ($C–CO_2$) баланса и его компонент: интенсивности аккумуляции атмосферного углерода растительными сообществами этих экосистем (первичная биологическая продукция, NPP) и эмиссии углерода в результате разложения микроорганизмами почвенного органического вещества и растительного детрита (гетеротрофное дыхание почвы, $R_Н$).

Площади залежных степных экосистем рассчитаны на основе данных статистических отчетов Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии о наличии и распределении земель в субъектах Российской Федерации и бюллетеней Федеральной службы государственной статистики о состоянии сельского хозяйства Российской Федерации в 2020 г. Согласно выполненным расчетам общая площадь залежных экосистем в степных регионах России составила около 177 тыс. $км^2$. Большая часть (54 %) залежных степных экосистем расположена в Азиатской части России. Общая площадь вторично-степных экосистем, которые появились на месте заброшенных пахотных земель в Сибирском и Центрально-Азиатском регионах России, составляют около 45 и 50 тыс. $км^2$ соответственно. В Европейском регионе процесс восстановления степного растительного покрова на необрабатываемых пашнях идет на территории в 82 тыс. $км^2$.

Показателем интенсивности процесса депонирования растительными сообществами экосистем углерода из атмосферы является первичная биологическая продукция, которая определяется количеством органического вещества, накапливающимся за определенный интервал времени (обычно за год) на единице площади в надземной и подземной частях растительного сообщества. Оценки NPP исследуемых экосистем получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием базы данных эмпирически измеренных значений этой величины. Для перевода значений NPP, выраженных через массу сухого вещества, в углеродные единицы использованы коэффициенты, полученные в работе [12].

Согласно полученным результатам, растительный покров залежных экосистем степного биома России ежегодно аккумулирует (110 ± 24) МтС (среднее ± стандартное отклонение). Растительность изучаемых степных экосистем Европейского региона России депонирует (47 ± 11) $МтСгод^{-1}$ или 42 % общего количества суммарной продуктивности залежных степных регионов России. В Центрально-Азиатском регионе рассматриваемые степные экосистемы абсорбируют (30 ± 6) $МтСгод^{-1}$ или 27 % общего количества первичной биологической продукции залежей

в степных регионах России. Растительность залежных степных экосистем Сибирского региона ежегодно депонирует (34 ± 1) Мт атмосферного углерода или 31 % общего количества первичной продукции залежей в степных регионах России. Интенсивность поглощения атмосферного углерода растительностью залежных экосистем степных регионов России представлена на рисунке 2. Согласно расчетам, среднее значение NPP для степных залежей на территории России оценивается в (622 ± 135) гСм$^{-2}$год$^{-1}$.

Величина почвенного дыхания степных залежей (потока CO_2 в атмосферу с поверхности почвы этих экосистем) оценена на основе регрессионной T&P-модели [13; 14]. Эта модель позволяет определить среднемесячную интенсивность выделения CO_2 из почв на основе среднемесячной приземной температуры воздуха и количества осадков за месяц. В рамках данного исследования значение годового потока CO_2 в атмосферу из почв степных залежных экосистем вычислялось как среднее соответствующих значений годовых потоков CO_2 по ансамблю из рассмотренных в работах [1; 14] версий T&P-модели. В проведенных расчетах принималось, что доля R_H в общем потоке CO_2 из почв травяных экосистем составляет 55 % [15].

Выполненные расчеты показали, что в результате гетеротрофного дыхания из почв залежных степных экосистем России в атмосферу ежегодно поступает около (60 ± 14) МтС. Эмиссия диоксида углерода в результате гетеротрофного дыхания из почв рассматриваемых залежных экосистем степного биома Европейского региона составляет (33 ± 4) МтСгод$^{-1}$. В Центрально-Азиатском регионе из исследуемых экосистем в атмосферу поступает до (12 ± 2) МтСгод$^{-1}$. Залежные степные экосистемы Сибирского региона ежегодно в результате гетеротрофного дыхания эмитируют (15 ± 1) МтС углерода. Интенсивности поступления С–CO_2 в атмосферу из почв залежных экосистем степных регионов России представлены на рисунке 2. Согласно расчетам, среднее значение R_H из степных залежей на территории России оценивается в (338 ± 76) гСм$^{-2}$год$^{-1}$.

Функционирование экосистемы в качестве стока или источника атмосферного CO_2 определяется знаком величины углеродного баланса рассматриваемой экосистемы. В случае природных степных экосистем углеродный баланс вычисляется как разность между величинами NPP и R_H [1; 14]. Если значение углеродного баланса положительное, то рассматриваемая экосистема является стоком атмосферного углерода. В случае отрица-

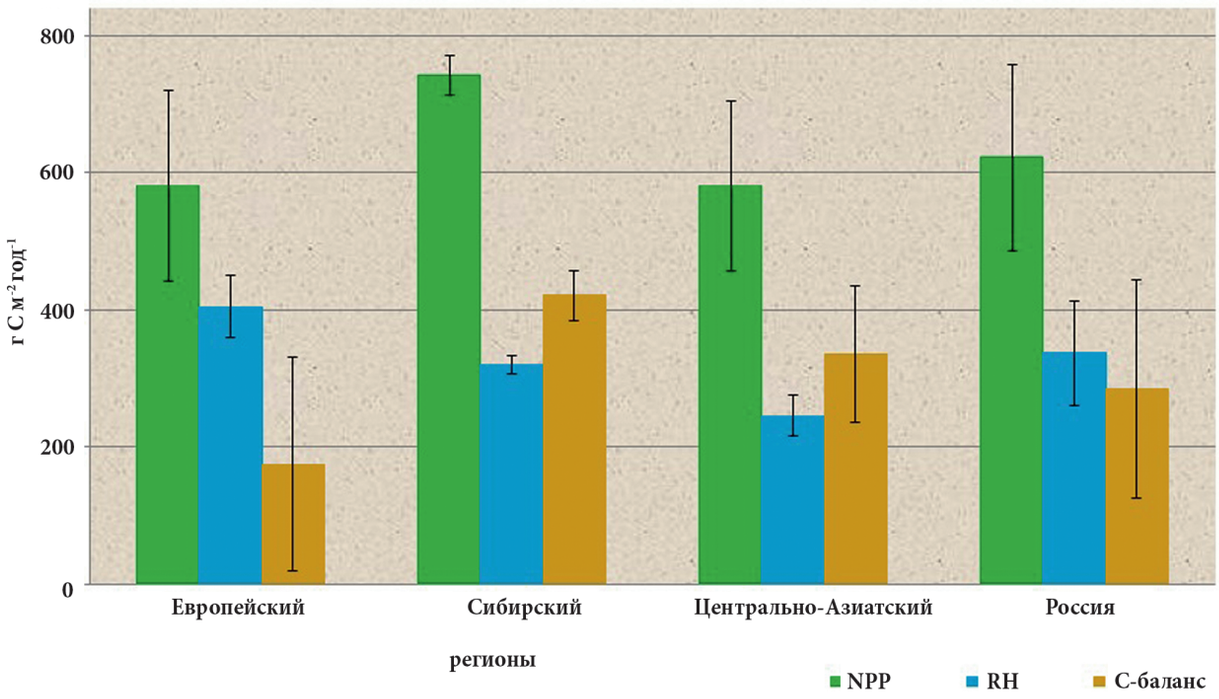


Рис. 2. Интенсивности потоков углерода в залежных экосистемах степных регионов России (среднее значение и стандартное отклонение): NPP – первичная биологическая продукция, RH – гетеротрофное дыхание, С-баланс – углеродный баланс

тельного значения углеродного баланса экосистема представляет собой источник углерода, который пополняет углеродный пул атмосферы.

Согласно полученным оценкам, залежные степные экосистемы России ежегодно поглощают (50 ± 28) МтС. Сток атмосферного углерода в залежные экосистемы степного биома Европейского, Сибирского и Центрально-Азиатского регионов России составляет соответственно 28 %, 38 % и 34 % годового депонирования углерода рассматриваемыми степными экосистемами. Расчетные величины углеродного баланса для залежных экосистем степных регионов России представлены на рисунке 2. Согласно расчетам среднее значение углеродного баланса для залежных степных экосистем на территории России составляет (285 ± 159) $гСм^{-2}год^{-1}$. Полученное значение $C–CO_2$ баланса в степных залежах значительно превышает сток углерода в экосистемы бореальных лесов Северного полушария, который оценен в 46 $гСм^{-2}год^{-1}$ [16].

Проведенное исследование показало, что залежные экосистемы степного биома России являются существенным стоком атмосферного диоксида углерода.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН «Моделирование влияния изменений климата на экологические процессы и системы» (рег. № 1021032424681-6).

Список литературы

1. *Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Estimation of carbon balance in steppe ecosystems of Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. Vol. 59. No. 1. P. 63–77.
2. *Мордкович В.Г.* Степные экосистемы. Новосибирск: Академическое издательство Гео, 2014. 170 с.
3. *Чибилёв А.А.* Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. М.; Оренбург: Институт степи РАН/РГО, 2016. 324 с.
4. *Титлянова А.А.* Освоение лесостепной и степной зон Западной Сибири увеличило эмиссию углерода // Степной бюллетень. 2000. № 8. С. 35–37.
5. *Titlyanova A.A., Bulavko G.I., Kudryashova S.YA. et al.* The reserves and losses of organic carbon in the soils of Siberia // Eurasian Soil Science. 1998. Vol. 31. No. 1. P. 45–53.
6. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soil // Plant and Soil. 2002. No. 241. P. 155–176.
7. *Soussana J.-F., Loiseau P., Vuichard N. et al.* Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands // Soil Use & Management. 2004. Vol. 20. No. 2. P. 219–230.
8. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
9. *Титлянова А.А., Самбу А.Д.* Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.
10. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. Vol. 133. P. 461–466.
11. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Shvidenko A.Z., Sapozhnikov P.M.* Changes in the organic carbon pool of abandoned soils in Russia (1990–2004) // Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 43. No. 3. P. 333–340.
12. *Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Svirezhev Yu.M.* Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems // Ecological Modelling. 1998. No. 108. P. 265–276.
13. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994 // Global Change Biology. 2002. No. 8. P. 800–812.
14. *Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Estimation of $C–CO_2$ balance of natural steppe ecosystems: Khakassia and Tuva (Eastern Siberia, Russia) case studies // IOP Conf. Ser. Earth. Environ. Sci. 2020. No. 606. P. 012013.
15. *Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems. Interim Report, IR-02-070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. 64 p.
16. *Virkkala A.-M., Aalto J., Rogers B.M. et al.* Statistical upscaling of ecosystem CO_2 fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: regional patterns and uncertainties // Global Change Biology. 2021. No. 27. P. 4040–4059.

ESTIMATIONS OF CARBON FLUXES IN STEPPE ABANDONED CROPLAND ECOSYSTEMS OF RUSSIA

L.L. Golubyatnikov[1], I.N Kurganova[2], V.O. Lopes de Gerenyu[2]

[1] Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
[2] Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Pushchino
golub@ifaran.ru, ikurg@mail.ru, vlopes@mail.ru

Abstract. In Russia, the territory with arid grassland ecosystems (steppe biome) is vast with area approximately $1{,}7 \times 10^6$ km^2. Soils with a high content of organic matter (chernozems and kastanozems) have formed on a significant part of the steppe biome. The high concentration of soil organic matter in steppe ecosystems determines both their high level of fertility and their significant contribution to global carbon sequestration. As a result of the fact that highly fertile soils have formed in the steppes, most of the steppe biome are used in agriculture as arable land, pastures and hayfields. As a result of changes in the land use system in Russia in the 90s of the last century, large areas of the agricultural lands were abandoned in steppe biome of Russia. Steppe vegetation has restored on former croplands over the last three decades. Now secondary (restored) steppes have formed on abandoned croplands. Using a database of Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography and Federal Service for State Statistic, we have estimated the areas for abandoned croplands in steppe biome. According to our calculations, restored steppes on abandoned croplands occupy in Russia about 177×10^3 km^2. Using the geoinformation-analytical method we estimated the mean annual biological productivity of the steppe ecosystems under study. Our calculations have shown that the restored steppe ecosystems on abandoned croplands accumulate (110 ± 24) MtC per year in Russia. The average net productivity values amount to (622 ± 136) gCm^{-2}yr^{-1} for these ecosystems. Based on the T&P-model and the root contribution to the soil respiration in grass ecosystems, we have obtained the estimates for heterotrophic respiration from soils of the restored steppe ecosystems on abandoned croplands in Russia. The average value of heterotrophic soil respiration for the steppe ecosystems under study amounts to (338 ± 76) gCm^{-2}yr^{-1}. We have estimated heterotrophic respiration from soils of these ecosystems in Russia as (60 ± 14) MtC per year. According to our estimation, the restored steppe ecosystems which were formed on abandoned croplands in Russia serve as a significant sink of carbon dioxide from the atmosphere. The intensity of this carbon flux in the ecosystems under study can be estimated at (285 ± 159) gCm^{-2}yr^{-1}. The annual accumulation of carbon dioxide in the restored steppe ecosystems on abandoned croplands of Russia is (50 ± 28) MtC.

Keywords: Abandoned cropland ecosystems, steppe biome, atmospheric carbon update, carbon dioxide emission, C–CO_2 balance.

References

1. *Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Estimation of carbon balance in steppe ecosystems of Russia. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. 59(1): 63–77.
2. *Mordkovich V.G. Stepnie ekosistemi* [Steppe Ecosystems]. Novosibirsk: Geo, 2014. 170 p. (In Russian).
3. *Chibilev A.A. Stepnaya Evraziya: regional'nii obzor prirodnogo raznoobraziya* [Steppe Eurasia: Regional Overview of Natural Diversity]. Orenburg: Institut stepi RAN/RGO, 2016. 324 p. (In Russian)
4. *Titlyanova A.A. Osvoenie lesostepnoi i stepnoi zon Zapadnoi Sibiri uvelichelo emissiyu ugleroda* [Development of the forest-steppe and steppe zones of Western Siberia has increased carbon emissions]. Stepnoi Byull. 2020. 8: 35–37. (In Russian)
5. *Titlyanova A.A., Bulavko G.I., Kudryashova S.Ya. et al.* The reserves and losses of organic carbon in the soils of Siberia. Eurasian Soil Science. 1998. 31(1): 45–53.
6. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soil. Plant and Soil. 2002. 241: 155–176.
7. *Soussana J.-F., Loiseau P., Vuichard N. et al.* Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. Soil Use & Management. 2004. 20(2): 219–230.
8. *Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A. et al. Dinamika sel'skohozyaistvennih zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of Agricultural Lands of Russia in the 20th Century and Postagrogenic Recovery of Vegetation and Soils]. Moscow: GEOS, 2010. 416 p. (In Russian).
9. *Titlyanova A.A., Sambuu A.D. Suktsesii v travyanih ekosistemah*. [Succession in Grasslands]. Novosibirsk: Siberian Branch Russ. Acad. Sci. 2016. 191 p. (In Russian).

10. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan. Catena, 2015. 133: 461–466.
11. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Shvidenko A.Z., Sapozhnikov P.M.* Changes in the organic carbon pool of abandoned soils in Russia (1990–2004). Eurasian Soil Science. 2010. 43(3): 333–340.
12. *Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Svirezhev Yu.M.* Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems. Ecological Modelling. 1998. 108: 265–276.
13. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994. Global Change Biology. 2002. 8: 800–812.
14. *Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Estimation of C–CO_2 balance of natural steppe ecosystems: Khakassia and Tuva (Eastern Siberia, Russia) case studies. IOP Conf. Ser. Earth. Environ. Sci. 2020. No. 606. P. 012013.
15. *Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems. Interim Report, IR-02-070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. 64 p.
16. *Virkkala A.-M., Aalto J., Rogers B.M. et al.* Statistical upscaling of ecosystem CO_2 fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: regional patterns and uncertainties // Global Change Biology. 2021. 27: 4040–4059.