

УДК 574.4

## УГЛЕРОДНЫЙ БЮДЖЕТ СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ

И. Н. Курганова<sup>1,\*</sup>, В. О. Лопес де Гереню<sup>1</sup>, А. Т. Жиенгалиев<sup>2</sup>,  
член-корреспондент РАН В. Н. Кудеяров<sup>1</sup>

Поступило 08.10.2018 г.

Залежи, сформированные на месте бывших пахотных угодий, занимают в зоне степей существенную площадь и представляют собой основной резерв для восстановления степного биома в России. С учётом сформированных на месте залежей вторичных степных экосистем величина общего стока диоксида углерода в степной зоне России может достигать 92–121 Мт С в год, что сравнимо со стоком CO<sub>2</sub> в управляемые леса Российской Федерации (96 Мт/год) и обеспечивает 10–20% общего стока CO<sub>2</sub> в наземные экосистемы России. Для увеличения мощности стокового потенциала на территории Российской Федерации естественные и восстановленные степные экосистемы должны быть сохранены.

*Ключевые слова:* степные биомы, залежные земли, чистая первичная продукция, дыхание почв, органический углерод.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856732-735>

Цикл органического углерода (С) является основным биогеохимическим циклом на нашей планете [3]. Его продукционная составляющая обусловлена ассимиляцией углерода в процессе фотосинтеза и выражается количеством чистой первичной продукции, образованной в течение года (Net Primary Production, NPP). Деструкционная ветвь этого цикла объединяет всё разнообразие процессов разложения органических материалов (почвы, подстилки и древесного дебриса) и выражается обычно через общую величину микробного дыхания (Microbial Respiration, MR). Дисбаланс между продукцией и деструкцией органического углерода определяет то его количество, которое выводится из цикла углерода, закрепляясь в почве, и выражается в изменении концентрации углекислого газа в атмосфере. Таким образом, через парниковый эффект биогенный цикл углерода связан с проблемой глобальных изменений климата, представляющих сегодня одну из важнейших экологических проблем.

Современный баланс углерода на территории России оценивается в диапазоне 0,5–1,0 Гт С/год, т.е. наша страна выступает абсолютным стоком диоксида углерода атмосферы, а её наземные экосистемы обеспечивают в настоящее время не менее 1/5 части глобального стока CO<sub>2</sub> [4]. К настоящему времени из всех типов наземных экосистем на терри-

тории России роль степного биома в биогенном цикле углерода наименее определена, что, по-видимому, объясняется относительно небольшой долей сохранившихся в нашей стране целинных степей. Вследствие того что под степной растительностью сформированы самые плодородные почвы (чернозёмы и каштановые), огромные степные пространства (за исключением опустыненных) были распаханы, а нераспаханные площади использовались под выпас или сенокосы. Площадь естественных степных экосистем на территории Российской Федерации оценивается сегодня в пределах 34–50 млн га [13, 15], что составляет примерно 21–30% от общей площади степной зоны. Вместе с тем на территории Северной Евразии располагается самая обширная в мире зона степей, которая тянется непрерывной полосой от Венгрии до Забайкалья [5, 9]. Занимая площадь 800 млн га [2], евразийские степи, их состояние и использование могут в значительной степени влиять на глобальный бюджет углерода. В рамках настоящего исследования была выполнена оценка основных составляющих баланса углерода в естественных степных экосистемах и определена роль степей в современном бюджете углерода на территории России.

Определение продукционной составляющей углеродного цикла естественных степных биомов было выполнено в рамках созданной базы данных по экспериментальному определению NPP (см. [1, 2, 7, 8 и др.], включающей 63 записи. Все степные экосистемы были отнесены к одному из следующих подтипов [5]: луговые, настоящие, засушливые, сухие и опустыненные (табл. 1). Найдено, что в зависи-

<sup>1</sup> Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской Академии наук, Пушкино Московской обл.

<sup>2</sup> Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Западно-Казахстанская обл.

\*E-mail: [ikurg@mail.ru](mailto:ikurg@mail.ru)

**Таблица 1.** Чистая первичная продукция (NPP, г С/(м<sup>2</sup>·год)) в различных подтипах степных экосистем

Параметр	Все степи	Степная экосистема				
		Луговая	Настоящая	Засушливая	Сухая	Опустыненная
Число экосистем	63	17	16	8	15	7
Среднее	640	813	703	608	541	328
Медиана	632	812	746	592	542	256
Минимум	209	502	372	264	263	209
Максимум	1058	1058	996	916	1010	485
Стандартное отклонение (STD)	226	162	167	216	194	117
Стандартная ошибка (SE)	29	39	42	76	50	44
Коэффициент вариации (CV), %	35	20	24	35	36	36

мости от подтипа NPP в степных экосистемах изменяется от  $813 \pm 99$  г С/(м<sup>2</sup>·год) в зоне луговых степей до  $328 \pm 44$  г С/(м<sup>2</sup>·год) в опустыненных. Средняя величина NPP в степных экосистемах России составляет  $640 \pm 29$  г С/(м<sup>2</sup>·год), что в 2 раза превышает среднее значение NPP на покрытых лесом землях Российской Федерации —  $319 \pm 19$  г С/(год·м<sup>2</sup>) [10].

Определение эмиссии CO<sub>2</sub> из почв целинных степей (или общего дыхания почв, Total Soil Respiration, TSR) на регулярной основе проводилось только в 19 экосистемах и в большинстве случаев в течение летнего (или вегетационного) периода (табл. 2). Оценки годовых потоков CO<sub>2</sub> из почв степей, выполненные на основе опубликованных данных и разработанной нами ранее модели [13], показывают их очень сильную вариабельность: от 194 до 3269 г С/(м<sup>2</sup>·год). Такой разброс величин годовых потоков CO<sub>2</sub> из почв целинных степей связан прежде всего с большим разнообразием почвенного и растительного покрова степей, различием в погодных условиях конкретных лет, когда проводились исследования, разницей в частоте и длительности измерений, а также различиями в методах, которые ис-

пользовались для измерения TSR. Средний годовой поток CO<sub>2</sub> из почв степных ценозов оценивается величиной  $869 \pm 174$  г С/(м<sup>2</sup>·год), а коэффициент вариабельности высок и составляет 87% (табл. 2).

На основе проведённого нами ранее анализа базы данных по вкладу корней в общий поток CO<sub>2</sub> из почв [13] было найдено, что в луговых и травяных экосистемах на долю корневой (Root Respiration, RR) и микробной (MR) составляющих приходится соответственно 45 и 55%. Таким образом, среднее значение MR для почв целинных степей составляет  $478 \pm 95$  г С/(м<sup>2</sup>·год) (табл. 2), а средняя величина баланса углерода, представляющая собой разность между NPP и MR (Net Ecosystem Production, NEP = NPP – MR), составляет  $162 \pm 99$  г С/(м<sup>2</sup>·год). Полученная оценка стока CO<sub>2</sub> в степных экосистемах России примерно в 2,5 раза превышает среднюю величину стока диоксида углерода на покрытых лесом землях России —  $66 \pm 15$  г С/(м<sup>2</sup>·год) [10], демонстрируя высокий стоковый потенциал целинных степей.

Прямые определения величины NEP в целинной степи Хакасии (юг Красноярского края) с использованием микрометеорологического метода показали, что естественная степная экосистема в течение вегетационного сезона поглощает углерод в количестве  $152 \pm 37$  г С/м<sup>2</sup>. Залежи, сформированные на бывших пахотных черноземах в степной зоне Хакасии, также выступают абсолютным стоком диоксида углерода с величиной NEE, равной 114–201 г С/м<sup>2</sup> за вегетацию [11]. И хотя за пределами вегетации, степные экосистемы представляют собой источник CO<sub>2</sub> в атмосферу за счёт микробного дыхания почв, его величина существенно меньше, чем то количество С, которое поглощают целинные степи в сезон вегетации [13]. Прямые определения углеродного баланса, проведённые в степных экосистемах Казахстана, которые близки по своим условиям формирования к степным регионам Сибири, показали, что они также являются стоком CO<sub>2</sub> ат-

**Таблица 2.** Общее и микробное дыхание почв в степных экосистемах (г С/(м<sup>2</sup>·год))

Параметр	Общее дыхание почв (TSR)		Микробное дыхание (MR, годовое)
	летнее	годовое	
Число экосистем	17	19	19
Среднее	491	869	478
Медиана	301	516	284
Минимум	112	194	107
Максимум	1372	3269	1798
Стандартное отклонение (STD)	377	757	416
Стандартная ошибка (SE)	91	174	95
Коэффициент вариации (CV), %	77	87	87

**Таблица 3.** Оценка баланса углерода (NEP, г С/(м<sup>2</sup>·год)) в степных экосистемах различных регионов мира на основе прямого определения микрометеорологическим методом (отрицательные значения NEP — источник CO<sub>2</sub>, положительные — сток)

Регион мира	Целина/залежи	Пастбища/выпас
Россия* [11]	151±37/146±201	
Казахстан [14]	42±173	-4±146
Европейские страны [11, 14]		-173±653
Северная Америка [11, 14]	-146±109	-69 ± +141

\* г С/м<sup>2</sup> за вегетационный период.

мосферы с близкими величинами NEP — от 43 до 173 г С/(м<sup>2</sup>·год) (табл. 3). В Западной Европе травяные и луговые экосистемы могут выступать как значительным стоком (>653 г С/(м<sup>2</sup>·год)), так и источником CO<sub>2</sub> с величиной NEP = -164 г С/(м<sup>2</sup>·год). В американских прериях разброс значений NEP также был весьма существенным — от 344 г С/(м<sup>2</sup>·год) (сток) до -173 г С/(м<sup>2</sup>·год) (источник), в зависимости от различных факторов — климатических, наличия выпаса или весенних палов. Таким образом, прямое определение способности степных экосистем к чистому поглощению диоксида углерода микрометеорологическим методом показало, что величина NEP в естественных степных экосистемах сильно варьирует, и для более надёжных оценок роли степей в Российском бюджете углерода необходимо расширять сеть таких наблюдений и их длительность.

С учётом площади, занятой степными экосистемами (34–50 млн га), и разницы в удельных оценках NEP, полученными прямым и разностным методами, суммарное поглощение диоксида углерода в степном регионе Российской Федерации может быть оценено в пределах от 52 ± 13 до 81 ± 50 Мт С в год. В результате забрасывания бывших пахотных угодий, обусловленного экономическим кризисом начала 90-х годов прошлого столетия, в степной зоне было заброшено 26 млн га залежных угодий, на месте которых к настоящему времени образовались вторичные (восстановленные) степи [6]. Экосистемы залежей в зоне степей также представляют устойчивый сток углерода [11, 14], величина которого составляет 114–201 г С/(м<sup>2</sup>·год) (табл. 3). С учётом площадей восстановленных степных экосистем величина общего стока диоксида углерода в степной зоне может достигать 92–121 Мт С в год, что сравнимо со стоком углерода в управляемые леса Российской Федерации (96 Мт/год) и составляет примерно 15% общего современного стока углерода

во все лесные земли России — 546 ± 120 Мт С/год [10]. По самым примерным оценкам целинные степные экосистемы и залежные земли, образовавшиеся в зоне степей на месте бывшей пашни, могут обеспечить 10–20% общего стока CO<sub>2</sub> в наземные экосистемы России, что составляет весьма существенную часть годового бюджета углерода на территории нашей страны. Учитывая мощный стоковый потенциал целинных и восстановленных степей, необходимо их сохранение и более рациональное использование с учётом тех приоритетов, которые созданы самой природой, а именно умеренный выпас в животноводстве [9] и использование почвосберегающих технологий в растениеводстве.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания “Исследование почвенных предшественников, источников и стоков парниковых газов в связи с климатическими изменениями”, рег. № АААА-А18–118013190177–9, при поддержке РФФИ (проект 18–04–00773а) и гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме: “Изучение запасов углерода и эмиссии диоксида углерода тёмно-каштановых почв в зависимости от типа землепользования в агроценозах Приуралья РК”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Гаджиев И.М., Королук А.Ю., Титлянова А.А. и др.* Степи Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 299 с.
3. *Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой биологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
4. *Курганова И.Н., Кудеяров В.Н.* // Наука в России. 2012. № 5. С.25–33.
5. *Мордкович В.Г.* Степные экосистемы. Новосибирск: Гео, 2014. 170 с.
6. *Смелянский И.Э.* // Степной бюл. 2012. № 36. С. 4–7.
7. *Титлянова А.А.* В кн.: Биологическая продуктивность травяных экосистем. Наука: Новосибирск, 1988. С. 109–128.
8. *Титлянова А.А., Шибарева С.В.* // Изв. РАН. Сер. географ. 2017. № 4. С. 43–55.
9. *Чибилёв А.А.* Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия М.; Оренбург: Ин-т степи РАН/РГО, 2017. 324 с.
10. *Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г.* // Сиб. лес. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
11. *Belelli Marchesini L., Papale D., Reichstein M., et al.* // Biogeosciences. 2007. V. 4. P. 581–595.

12. *Gilmanov T.G., Verma S.B., Sims P.L., et al.* // *Global Biogeochem. Cycles*. 2003. V. 17. № 2. 1071. DOI: 10.1029/2002GB002023.
13. *Kudiyarov V.N., Kurganova I.N.* // *Eurasian Soil Sci.* 2005. V. 38. № 9. P. 983–992.
14. *Perez-Quezada J.F., Saliendra N.Z., Akshalov K., et al.* // *Rangeland Ecol. Manag.* 2010. V. 63. P. 82–93.
15. *Smelansky I.E., Tishkov A.A.* *Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World*. B.: Springer, 2012. P. 45–101.

## CARBON BUDGETS IN THE STEPPE ECOSYSTEMS OF RUSSIA

I. N. Kurganova<sup>1</sup>, V. O. Lopes de Gerenyu<sup>1</sup>, A. T. Zhiengaliyev<sup>2</sup>,  
Corresponding Member of the RAS V. N. Kudiyarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University, Ural'sk, Kazakhstan Republic*

Received October 8, 2018

Abandoned lands formed in the place of former arable lands occupy considerable areas in the steppe zone and are a basic reserve for the restoration of the steppe biome in Russia. Taking into account the secondary steppe ecosystems developed in the place of the abandoned lands, the total carbon dioxide sink in the steppe zone of Russia can reach 92–121 Mt C per year. This is comparable to the CO<sub>2</sub> sink in the managed forests of the Russian Federation (96 Mt/yr) and accounts for 10–20% of the total sink of CO<sub>2</sub> in the terrestrial ecosystems of Russia. To increase the sink potential on the territory of the Russian Federation, the natural and restored steppe ecosystems should be preserved.

*Keywords:* steppe biome, abandoned lands, net ecosystem production, soil respiration, organic carbon.