УДК 574 DOI: 10.23885/2500-395X-2022-1-7-16-20

ОЦЕНКИ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНО-ТУВИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Л.Л. Голубятников[1], Е.А. Заров[2]
[1]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва
[2]Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск
golub@ifaran.ru, zarov.evgen@yandex.ru

Аннотация. Центрально-Тувинская котловина расположена в центральной части Республики Тыва. На основе спутниковых изображений с космического аппарата Landsat-8 на территории котловины выделены 7 классов наземной поверхности и 6 типов степных экосистем на равнинной части котловины. Дешифрирование спутниковых снимков позволило составить карту-схему экосистем котловины. По данным пяти метеорологических станций, расположенных на территории котловины, за период 2009–2021 гг. определены основные климатические характеристики изучаемой территории. Оценки первичной биологической продукции степных экосистем в Центрально-Тувинской котловине получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием данных эмпирически измеренных значений этой величины. Оценки почвенного дыхания степных экосистем исследуемого региона рассчитаны на основе регрессионной T&P-модели. Получена оценка углеродного ($C–CO_2$) баланса равнинных степных экосистем Центрально-Тувинской котловины. Показано, что рассматриваемые степные экосистемы являются стоком атмосферного углерода. Средняя интенсивность этого потока составляет 408 ± 79 $гСм^{-2}$ $год^{-1}$. Равнинные степные экосистемы Центрально-Тувинской котловины ежегодно поглощают 4,1 ± 0,8 МтС.

Ключевые слова: степные экосистемы, поглощение атмосферного углерода, эмиссия диоксида углерода, углеродный баланс, космические снимки, Центрально-Тувинская котловина.

К настоящему времени из всех типов наземных экосистем на территории России роль степных экосистем в биогенном цикле углерода наименее определена [1]. В данной работе для равнинных степных экосистем Центрально-Тувинской котловины оценены углеродный ($C–CO_2$) баланс и его компоненты: интенсивность процесса аккумуляции атмосферного углерода растительными сообществами этих экосистем (первичная биологическая продукция, NPP) и эмиссия углерода в результате деструкции почвенного органического вещества микроорганизмами (гетеротрофное дыхание почвы, R_H).

Центрально-Тувинская котловина расположена в центральной части Республики Тыва примерно между 50°57'–52°02' с.ш. и 90°00'–95°51' в.д. Эта котловина является обширной межгорной депрессией на территории Тывы. Протяженность котловины с запада на восток составляет около 400 км, с севера на юг – от 25–30 до 60–80 км. Абсолютные высоты рельефа изменяются от 600 до 900 м. С севера котловину ограничивают хребты Западного Саяна, с юга – хребты Западный и Восточный Танну-Ола и хребет Хорумнуг-Тайга, с запада – хребты Шапшальский и Цаган-Шибэту, с востока – горные массивы Восточно-Тувинского нагорья. Невысоким хребтом Адар-Даш Центрально-Тувинская котловина разделена на западную и восточную части – Хемчикскую и Улуг-Хемскую котловины, соответственно. Рельеф котловины холмисто-равнинный и мелкосопочный [2]. Местами в котловину вдаются отроги соседних хребтов. Котловину прорезает долина Верхнего Енисея, часть этой долины протяженностью около 79 км затоплена водами Саяно-Шушенского водохранилища [3].

Для рассматриваемого региона характерен резко континентальный климат. Засушливость климата возрастает с востока на запад [3]. На основе данных пяти метеорологических станций, расположенных на территории котловины, за период 2009–2021 гг. определены основные климатические характеристики изучаемой территории (табл. 1). Среднегодовая температура воздуха имеет отрицательные значения и изменяется от –0,5 °С до –1,1 °С. Количество годовых осадков составляет в среднем 220–380 мм. Вегетационный период продолжается с мая по сентябрь. Лето, как правило, жаркое: средняя температура июля составляет от +19 °С до +21 °С, максимальная температура воздуха достигает значений +45 °С. В теплый период года выпадает до 81 % годовой суммы осадков. В зимний период котловина находится в зоне обширного и устойчивого центральноазиатского антициклона. Зима в регионе холодная с преобладанием ясных и солнечных дней, малоснежная (высота снежного покрова не превышает 20 см). Средняя температура января составляет от –26 °С до –30 °С, минимальные температуры фиксирова-

лись в диапазоне от –44 °С до –49 °С. По годовым климатическим характеристикам в Хемчикской котловине выделяются более теплая и сухая западная часть, более холодная и менее сухая восточная часть. Улуг-Хемская котловина подразделяется на холодную и сухую западную часть, умеренно холодную и менее сухую северо-восточную часть, холодную и увлажненную юго-восточную часть.

Таблица 1

Основные климатические характеристики Центрально-Тувинской котловины

Метеостанция	T, °С			P, мм/год	$P_{тп}$, %	$T_{>0}$, °С
	год	январь	июль			
Тээли	–0.6	–25.9	18.9	224.4	79	2510.4
Чадан	–0.8	–27.5	19.5	289.0	81	–
Шагонар	–1.0	–30.3	20.9	220.4	76	–
Кызыл	–0.5	–29.1	21.0	259.3	75	2809.5
Сосновка	–1.1	–26.0	18.1	382.0	74	2374.6

Примечание. T – приповерхностная температура воздуха, P – количество осадков, $P_{тп}$ – количество осадков за теплый период года, $T_{>0}$ – сумма положительных температур за год. Климатические характеристики определены на основе данных сайтов «Расписание Погоды» (http://www.rp5.ru/) и «Погода и климат» (http://www.pogodaiklimat.ru/).

На равнинной территории Центрально-Тувинской котловины экосистемы образуют мозаичную структуру из настоящих, сухих и опустыненных степей. Луговые степи встречаются на небольших по площади территориях, расположенных в предгорьях хребтов ограничивающих котловину с юга [3–4]. Значительная часть степных территорий котловины используется как пастбища и сенокосы, небольшие степные участки распаханы под выращивание зерновых культур.

Карта-схема пространственного распределения экосистем на территории Центрально-Тувинской котловины (рис. 1) составлена на основе дешифровки спутниковых изображений с космического

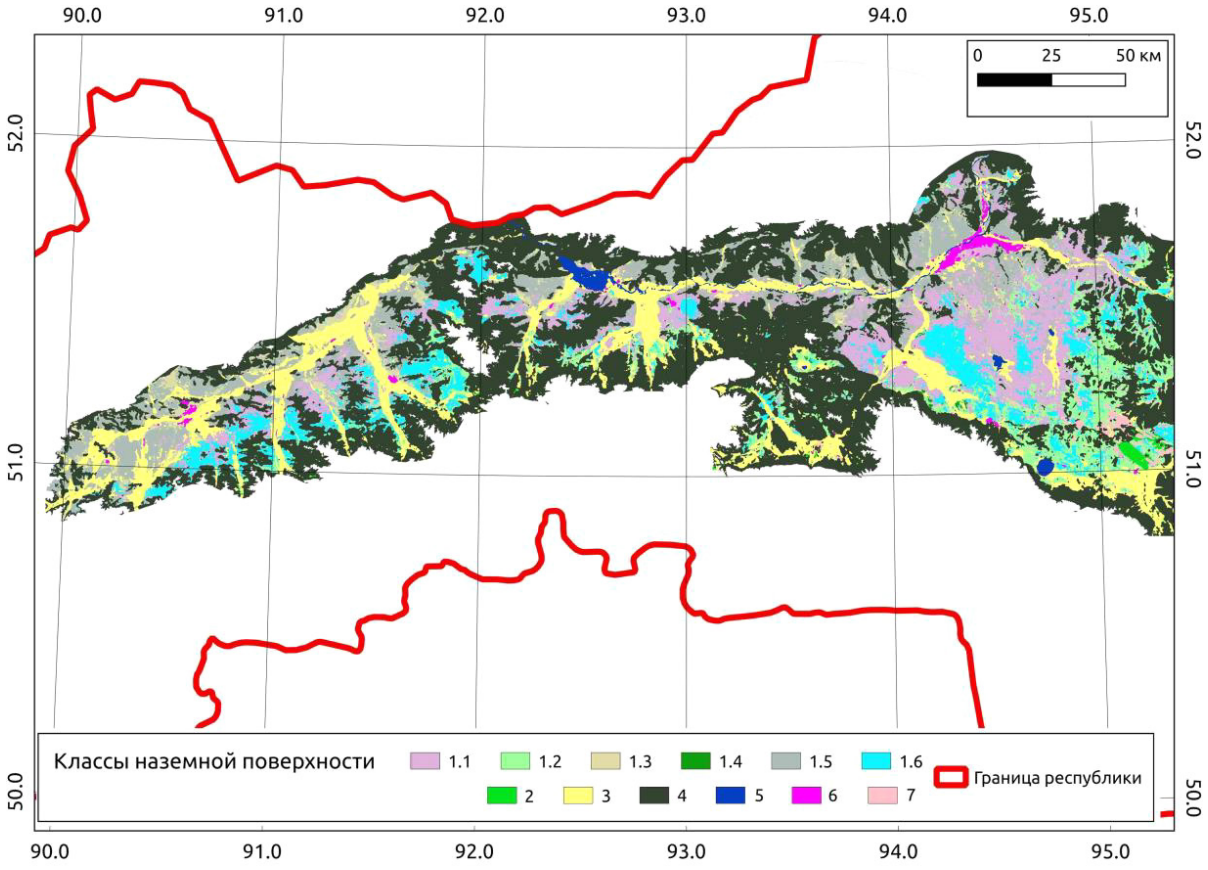


Рис. 1. Классы наземной поверхности на территории Центрально-Тувинской котловины по данным снимков с Landsat-8

Примечание. Названия классов приведены в тексте статьи.

аппарата Landsat-8. Использовались космоснимки для летних периодов 2019–2021 гг. Исходные материалы спутниковой съемки получены с сайта геологической службы США (http:// earthexplorer.usgs.gov). Обработка космических снимков проведена в геоинформационной системе GRASS с использованием метода классификации SMAP. В результате анализа космических снимков на территории Центрально-Тувинской котловины выделены 7 классов наземной поверхности: 1 – равнинные степи, 2 – равнинные лесные массивы, 3 – поймы рек и приозерные территории, 4 – горные территории, 5 – водные объекты, 6 – инфраструктура (города, поселки, стойбища, дороги и пр.), 7 – зарастающие деревьями лесные гари на равнинах. На территории занятой классом наземной поверхности «равнинные степи» были выделены следующие типы степных территорий:

1.1 – сухая степь;
1.2 – залежи с кустарниковой и древесной растительностью;
1.3 – территории с опустыниванием (пески, котлы выдувания и пр.);
1.4 – луговая степь;
1.5 – опустыненная степь;
1.6 – пашни и залежи.

Согласно выполненным расчетам, равнинные степные экосистемы занимают в Центрально-Тувинской котловине около 10 тыс. км². В Хемчикской котловине находится 29 % этих территорий, в Улуг-Хемской котловине – 71 %. В настоящее время в Центрально-Тувинской котловине под пашню используется около 4 % территории. На заброшенных пашнях (залежах) идет процесс постепенно восстановления степного травяного покрова. Как показывают исследования [3] на залежах возраста более двадцати лет видовой состав травяных сообществ близок к видовому составу исходных степных сообществ. На многих залежных территориях разрастаются кустарники караганы Бунге. На некоторых залежах возникают редины из вязов, тополей, сосны, лиственницы. Из составленной карты-схемы следует, что в восточной части Центрально-Тувинской котловины преобладают сухие степи. В западной части котловины большие площади заняты опустыненными степями. Значительные площади на территории Центрально-Тувинской котловины используются как пастбища. При повышенной пастбищной нагрузке, которая наблюдается на многих пастбищах данной котловины, в степных экосистемах происходит изменение состава травяного покрова.

Первичная биологическая продукция (NPP) определяется количеством органического вещества, накапливающимся за определенный интервал времени (обычно это год) на единице площади в надземной и подземной частях растительного сообщества. Оценки NPP степных экосистем в Центрально-Тувинской котловине получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием данных эмпирически измеренных значений этой величины из работ [3; 5; 6]. Для перевода значений NPP, выраженных через массу сухого вещества, в углеродные единицы использованы коэффициенты, полученные в [7].

Значения NPP степных экосистем уменьшаются от луговых степей к опустыненным, Для луговых степей Центрально-Тувинской котловины характерна величина NPP 1273 ± 275 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ (среднее ± стандартное отклонение) В опустыненных степях рассматриваемого региона значение NPP уменьшается до 374 ± 67 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$. Согласно полученным результатам равнинные степные экосистемы Центрально-Тувинской котловины ежегодно аккумулируют 6,9 ± 0,9 МтС.

Оценки почвенного дыхания степных экосистем исследуемого региона получены на основе регрессионной T&P-модели [8]. Эта модель позволяет оценивать среднемесячную интенсивность выделения CO_2 из почв на основе среднемесячной приземной температуры воздуха и количества осадков за месяц. В рамках настоящего исследования значение годового потока CO_2 в атмосферу из почв степных экосистем Центрально-Тувинской котловины вычислялось как среднее соответствующих значений годовых потоков CO_2 по ансамблю из предложенных в работе [9] версий T&P-модели. Согласно [10] доля гетеротрофного дыхания в общем потоке CO_2 из почв травяных экосистем составляет 55 %.

Выполненные расчеты показали, что в результате гетеротрофного дыхания из почв степных экосистем Центрально-Тувинской котловины в атмосферу ежегодно поступает 2,8 ± 0,1 МтС. В Хемчикской котловине интенсивность гетеротрофного дыхания из почв степных экосистем изменяется от 248 ± 19 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в западной части до 285 ± 26 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в восточной части. В Улуг-Хемской котловине значения R_H исследуемых экосистем варьируют от 267 ± 23 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в западной части до 299 ± 24 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в юго-восточной части котловины. Среднее значение R_H равнинных степных экосистем Центрально-Тувинской котловины оценивается в 279 ± 14 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$.

Функционирование экосистемы в качестве стока или источника атмосферного CO_2 определяется знаком величины углеродного ($C–CO_2$) баланса рассматриваемой экосистемы. В случае природных степных экосистем углеродный баланс вычисляется как разность между величинами NPP и R_H [1; 9]. Если значение углеродного баланса положительное, то рассматриваемая экосистема является стоком атмосферного углерода. В случае если значение углеродного баланса отрицательное, то экосистема представляет собой источник атмосферного углерода.

Согласно полученным оценкам среднее значение углеродного баланса для равнинных степных экосистем Центрально-Тувинской котловины составляет 408 ± 79 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$, варьируя от 272 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в западной части Хемчикской котловины до 578 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ в юго-восточной части Улуг-Хемской котловины. Выполненные расчеты показали, что равнинные степные экосистемы Центрально-Тувинской котловины ежегодно поглощают $4{,}1 \pm 0{,}8$ МтС. Результаты исследования показали, что исследуемые степные экосистемы являются стоком атмосферного углерода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19–29-05208) 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. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Zhiengaliyev A.T., Kudeyarov V.N.* Carbon budgets in the steppe ecosystems of Russia // Doklady Earth Sciences. 2019. No. 485. P. 450–452.
2. *Голубятников Л.Л., Заров Е.А.* Пространственное распределение экосистем в Центрально-Тувинской котловине // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. № 6. С. 75–78.
3. *Титлянова А.А., Самбу А.Д.* Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.
4. *Самбуу А.Д., Прудникова Т.Н., Голубятников Л.Л.* Природные ресурсы Республики Тыва. Т. II. Новосибирск: Гарамонд, 2020. 208 с.
5. *Гаджиев И.М., Королюк А.Ю., Титлянова А.А. и др.* Степи Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 299 с.
6. *Титлянова А.А., Косых Н.П., Кыргыс Ч.С. и др.* Продуктивность травяных экосистем Тувы // Почвы и окружающая среда. 2020. Вып. 3. № 2. С. 110.
7. *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.
8. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // Global Change Biology. 2002. No. 8. P. 800–812.
9. *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. 2020. Sci. 606. P. 012013.
10. *Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems // Interim Report. IR-02–070. Laxenburg; Austria: IIASA, 2003. 64 p.

ESTIMATIONS OF CARBON FLUXES IN STEPPE ECOSYSTEMS OF CENTRAL TUVINIAN BASIN

***L.L. Golubyatnikov*[1], *E.A. Zarov*[2]**
[1]Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow
[2]Yugra State University, Khanty-Mansiysk
golub@ifaran.ru, zarov.evgen@yandex.ru

Abstract. The Central Tuvinian Basin is located in the center of the Republic of Tuva. The region is characterized by a sharply continental climate. The main climatic characteristics of the territory under study are determined for the period 2009–2021 according to data from five meteorological stations located in the basin. To analyze the pattern of ecosystems on the territory of the Central Tuvinian Basin the images from the Landsat-8 satellite were used. Based on satellite information, 7 land units and 6 types of plain steppe ecosystems were identified in the Central Tuvinian Basin. According to the calculations, plain steppe ecosystems occupy about 10 thousand km^2 in the basin. Based on the satellite images, a map-scheme for ecosystems pattern on the territory of the Central Tuvinian Basin was made. Estimation of net primary production for the steppe ecosystems in the studied region was obtained on the basis of a geoinformation-analytical method. To estimate the intensity of carbon dioxide flux from soils into the atmosphere (the soil respiration) in the basin, the climate-driven regression mode (T&P model) was used. The $C–CO_2$ balance of studied steppe ecosystems was calculated. Plain steppes in the Central Tuvinian Basin serve as a significant sink of carbon dioxide from the atmosphere. The intensity of this carbon flux in the region can be estimated as 408 ± 79 $gCm^{-2}yr^{-1}$. The annual absorption of carbon dioxide in the plain steppe ecosystems under study is evaluated as 4.1 ± 0.8 MtC.

Keywords: Steppe ecosystems, atmospheric carbon update, carbon dioxide emission, $C–CO_2$ balance, satellite images, Central Tuvinian Basin.

References

1. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Zhiengaliyev A.T., Kudeyarov V.N.* Carbon budgets in the steppe ecosystems of Russia // Doklady Earth Sciences. 2019. No. 485. P. 450–452.
2. *Golubyatnikov L.L., Zarov E.A.* Prostranstvennoe raspredelenie ecosystem v Tsentralno-Tuvinskoi kotlovine. [Ecosystems pattern of Central Tuvinian basin] // Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems. 2021. No. 6. P. 75–78. (In Russian).
3. *Titlyanova A.A., Sambuu A.D.* Suktsesii v travyanih ekosistemah. [Succession in Grasslands]. Novosibirsk: Siberian Branch Russ. // Acad. Sci. 2016. 191 p. (In Russian).
4. *Sambuu A.D., Prudnikova T.N., Golubyatnikov L.L.* Prirodnie resursi Respubliki Tiva. T. II. [Natural Resources in the Republic of Tyva. V. II]. Novosibirsk: Garamond, 2020. 208 p. (In Russian).
5. *Gadzhiev I.M., Korolyuk A.Yu., Titlyanova A.A. et al.* Stepi Tsentralnoi Azii. [Steppes of Central Asia]. Novosibirsk: Siberian Branch Russ. // Acad. Sci. 2002. 299 p. (In Russian).
6. *Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Kyrgys Ch.S. et al.* Produktivnost' travianih ekosistem Tuvi. [Productivity of grassland ecosystems in the Tyva Republic, Russia] // The Journal of Soils and Environment. 2020. 3(2): e110. (In Russian).
7. *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.
8. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // Global Change Biology. 2002. No. 8. P. 800–812.
9. *Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Estimation of $C\text{-}CO_2$ balance of natural steppe ecosystems: Khakassia and Tuva (Eastern Siberia, Russia) case studies // IOP Conf. Ser. Earth. Environ. Sci. 2020. No. 606. P. 012013.
10. *Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems // Interim Report, IR-02–070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. 64 p.