

ДИСКУССИИ

УДК 631.4

ВОЗМОЖЕН ЛИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ДИСБАЛАНС КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА (СТОК) НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ?

Курганова И. Н., Кудеяров В. Н.

ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино

ikurg@mail.ru

Цитирование: Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. 2015. Возможен ли значительный положительный дисбаланс круговорота углерода (сток) на территории России? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 6. № 1 (11). С. 32-35.

Отвечая на вопрос д.б.н. проф. А.В. Смагина [2014] «Возможен ли значительный положительный дисбаланс круговорота углерода (сток) на территории России?», поднятого в разделе «Дискуссии» ДОСиГИК, нам хотелось бы поделиться следующими размышлениями, основанными на анализе современной литературы и в более расширенном виде опубликованными в журнале «Наука в России» (2012, № 5, с. 25-32).

Положительный дисбаланс круговорота углерода отмечается не только на территории России, но и в общепланетарном масштабе. Оценка баланса углерода на нашей планете ежегодно проводится в рамках Глобального Углеродного Проекта (*Global Carbon Project*), объединяющего исследования ученых большинства европейских и североамериканских стран. Расчет глобального бюджета углерода строится ими по принципу остаточного количества, то есть представляет собой разность между выделением CO₂ в атмосферу в результате сжигания топлива и изменения землепользования (источники – *sources*) и поглощением CO₂ в системе атмосфера-океан с учетом изменения общей концентрации атмосферного CO₂ за анализируемый период (стоки – *sinks*). Динамика основных статей, определяющих глобальный баланс CO₂ на нашей планете, за последние 250 лет имеет различные тенденции. Так, параллельно с экспоненциальным ростом эмиссии диоксида углерода в результате сжигания ископаемого топлива (*fossil fuel emission, FFE*) происходит экспоненциальное увеличение пула атмосферного CO₂ (*atmospheric C pool, AtP*), в то время как эмиссия CO₂, обусловленная изменениями в землепользовании (*land use change, LUC*), и сток углерода в океан (*ocean C pool, OcP*), характеризуются довольно плавным ростом в первые два столетия, а затем, после 1970-1980 гг., изменение этих величин зачастую имеет разнонаправленные тенденции в различные временные интервалы. Средняя эмиссия CO₂ вследствие сжигания топлива и изменений в землепользовании для первой декады XXI столетия (2000-2010 гг.) составляет соответственно 7.9 ± 0.5 и 1.0 ± 0.7 Гт С/год [Global Carbon Project, 2011]. Изменение пула атмосферного CO₂ за тот же период оценивается величиной, равной 4.1 ± 0.2 Гт С/год, а средний сток С в океан, рассчитанный на основании данных процессного моделирования, составляет 2.3 ± 0.5 Гт С/год. Разность между статьями стока (*AtP + OcP*) и источниками CO₂ (*FFE + LUC*) характеризует величину поглощения углерода наземными экосистемами (*land sink, LS*) и за период 2000-2010 гг. оценивается величиной, равной 2.5 ± 1.0 Гт С/год. Неопределенность полученного значения *LS* достаточно высока (~40%) и основной вклад в нее (~50%) вносит погрешность величины *LUC*, т.е. эмиссии CO₂, вызванной изменениями землепользования (сведение лесов в тропиках и др.).

Другой способ оценки глобального баланса углерода, базирующийся на данных моделирования атмосферно-биосферного обмена в наземных экосистемах, был реализован в работе японского исследователя А. Ито [2003], который построил свои расчеты на основе климатических данных, изменений в концентрации атмосферного CO₂ и соотношении стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в почве и растительности за период с 1953 по 1999 гг. Разработанная им модель *Sim-CYCLE* позволяет оценить баланс углерода в наземных экосистемах на основе двух основных разнонаправленных потоков CO₂, связанных с фотосинтетической ассимиляцией С растениями (*NPP*) и микробным разложением органических материалов (*MR*). Величина чистой продукции экосистем нашей планеты (*NEP*) представляет собой разность между *MR* и *NPP* и выступает характеристикой глобального баланса С. В этой работе для периода 1990-1999 гг. *NEP* оценивается величиной, равной 2.1 Гт С/год,

свидетельствуя в пользу того, что наземные экосистемы планеты являются безусловным стоком углерода.

Описанные выше подходы для построения глобального баланса CO_2 , являющиеся принципиально различными по сути, дают близкие по величине оценки стока CO_2 в наземные экосистемы планеты – 2.1-2.5 Гт С/год, что может служить подтверждением их достаточно высокой правдоподобности. Безусловно, полученные величины глобального баланса С, как и многие подобные расчеты, включают в себя ошибки статистического анализа и модельных построений, но в то же время, по мнению М.А. Глазовской [2009], это «не исключает наличия на суше не учитываемых факторов и механизмов консервации части избыточного ежегодно поступающего в атмосферу CO_2 ». Действительно, до сих пор механизмы, отвечающие за этот общепланетарный сток, не вполне понятны, и, по-видимому, их природа не имеет однозначного объяснения. По этой причине обнаруженный глобальный сток углерода в англоязычной литературе называют «missing sink» (*MS*). Наиболее вероятным объяснением его происхождения является множественный механизм, который включает отрицательную обратную связь с глобальным потеплением, выражающуюся в усилении связывания углерода растительностью за счет увеличения доступного растениям азота, чистое накопление $\text{C}_{\text{орг}}$ почвами и возможность стока части углерода в педосферу, особенно в ее глубокие слои [Houghton et al., 1998].

Как же распределяется на нашей планете этот так называемый «неучтенный сток» углерода? Согласно расчетам международного коллектива авторов [Pan et al., 2011], опубликованным в журнале Science (одном из самых цитируемых научных изданий), практически весь неучтенный сток углерода, возможно, сосредоточен в лесных экосистемах мира, суммарное депонирование С в которых в 1990-2007 гг. составляло 2.3-2.5 Гт С/год. Около половины этого стока (1.02-1.33 Гт С/год) сосредоточено в нетронутых тропических лесах, а другая его часть – 1.17-1.28 Гт С/год – приходится на бореальные и умеренные леса, которые сосредоточены, главным образом, в северном полушарии нашей планеты. И именно северное полушарие, по мнению ряда ученых, следует признать «легкими планеты», поскольку в соответствии с модельными расчетами, проведенными в разное время разными коллективами авторов [Gurney et al., 2003; Ciais et al., 2010], сток углерода в наземные экосистемы этого полушария составляет 1.66-1.73 Гт С/год.

С помощью метода обратного моделирования было оценено распределение глобального стока углерода в соответствии с различным типом экосистем для 2000-2004 гг. и показано, что на долю лесов северного полушария из общей величины стока, равной 1.66 Гт С/год, приходится приблизительно 60% или 1.0 Гт С/год, что довольно хорошо согласуется с оценками большого коллектива зарубежных исследователей [Pan et al., 2011], составляющими 1.02-1.33 Гт С/год. Причем на долю России приходится 45.5% общего стока С в северном полушарии, а депонирование углерода российскими лесами составляет 56.3% от общего накопления С в лесных экосистемах северного полушария. Таким образом, роль наземных экосистем России в общепланетарном биогеохимическом цикле углерода представляется весьма значительной, и в связи с этим в последние годы оценка углеродного баланса нашей страны все чаще привлекает внимание исследователей.

Согласно современным представлениям, первичная продуктивность растительности на территории России, оцененная на основе так называемого «хлорофильного индекса» с учетом площадей, занимаемых тем или иным типом растительности, составляет 4.34-4.73 Гт С/год [Мокроносов, 1999; Воронин и Блэк, 2005] или 6.8-7.8% глобального фотосинтетического стока (таблица). Вторая составляющая баланса CO_2 на территории России – микробная компонента общего дыхания почв Российской Федерации – в соответствии с оценками различных исследователей [Кудеяров, 2000; Nilsson et al., 2000; Kurganova, 2003; Kurganova et al., 2010; Mukhortova et al., 2015], варьирует от 2.6 до 3.2 Гт С/год (или 4.2-5.2% глобальной величины MR). Следует, однако, отметить, что все приведенные выше оценки относятся к 1990 г., который является базовым для стран-участниц Киотского протокола, поскольку они строились на анализе литературных данных, большая часть которых была получена в 1950-1990 гг. прошлого столетия, а используемые при расчетах карты (почвенная, землепользования и растительности) относятся к 1988-1990 гг. Третий компонент балансовых расчетов – антропогенная эмиссия CO_2 на территории РФ – для 2002-2006 г. оценивается величиной 0.80 Гт С/год [Кудеяров и др., 2007].

Последующие оценки баланса С для территории России, проведенные в разное время в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН [Кудеяров и др., 2007] показали, что наземные экосистемы Российской Федерации выступают безусловным стоком атмосферного CO_2 в размере 0.81-1.10 Гт С/год и хорошо согласуются с данными модельных построений – 0.83 Гт С/год [Ciais et al., 2010]). Оценка баланса углерода в наземных экосистемах

нашей страны, полученная большим коллективом авторов из разных стран для последней декады (2000-2010 гг.) также свидетельствует в пользу преобладания стока углерода над его потерями, но оценивается несколько меньшей величиной: 0.5-0.7 Гт С/год [Shvidenko et al., 2011; Dolman et al., 2012]. Возможное распределение стока углерода на территории России с учетом типа экосистем было представлено при помощи метода инверсного моделирования и показано, что в среднем в 2000-2004 гг. около 70% накопленного С располагалось в лесных экосистемах, а на остальные типы биотопов (тундра+кустарники, степи+полупустыни, реки, ненарушенные торфяники) приходилось от 4 до 10% аккумулированного С.

Таблица. Современная оценка баланса углерода и его основных составляющих в наземных экосистемах России и мира.

Показатель	Экосистемы мира	Экосистемы России	
		Абсолютные единицы	% к мировым значениям
Площадь, млн. км ²	148.7	17.1	11.5
NPP, Гт С/год	+63.6	+4.34-4.73	6.8-7.8
MR, Гт С/год	-61.5	-2.60-3.05	4.2-5.2
FFE, Гт С/год	-9.1 ± 0.5	-0.46	5.1
LUC, Гт С/год	-0.9 ± 0.7	+0.11	-
NEP (или LS), Гт С/год	+2.1- 2.5	+0.50-1.00	20.0-47.6
NBP, Гт С	1500-1700	298-342	17.5-22.8

Таким образом, проведенный анализ позволяет заключить, что современный (на 2000-2010 гг.) баланс углерода на территории Российской Федерации оценивается в диапазоне от 0.5 до 1.0 Гт С/год, свидетельствуя в пользу того, что Россия выступает абсолютным стоком диоксида углерода атмосферы. Наземные экосистемы нашей страны обеспечивают в настоящее время не менее 1/5 части глобального стока CO₂ атмосферы, главным образом за счет лесных территорий и зарастающих сельскохозяйственных угодий.

Используемые сокращения

FFE - Сжигание ископаемого топлива (*fossil fuel emission*);
 AtP - пул атмосферного CO₂ (*atmospheric C pool*);
 LUC - изменения в землепользовании (*land use change*);
OcP - сток углерода в океан (*ocean C pool*);
LS - поглощения углерода наземными экосистемами (*land sink*);
 NPP - фотосинтетическая ассимиляция С растениями (*net primary production*);
 MR - микробное разложение органических материалов (*microbial respiration*);
 NEP - чистая продукция экосистем (*net ecosystem production*);
MS - неучтенный сток углерода (*missing sink*).

ЛИТЕРАТУРА

- Воронин П.Ю., Блэк К.К. 2005. Значение и место фотосинтетического стока углерода в органической ветви его глобального цикла // Физиология растений. Т 52. С. 81-89.
- Глазовская М.А. 2009. Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: Книжный дом «Либроком». 336 с.
- Кудеяров В.Н. 2000. Вклад почвы в баланс CO₂ атмосферы на территории России // Доклады РАН. Т. 375. С. 275-277.
- Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И. 2007. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука. 315 с.
- Мокроносов А.Т. 1999. Глобальный фотосинтез и биоразнообразие растительности // Глобальные изменения природной среды и климата: Круговорот углерода на территории России. С. 19-62.
- Смагин А.В. 2014. Спорные вопросы количественной оценки газовых потоков между почвой и атмосферой (к дискуссии М.В. Глаголева и А.В. Наумова) // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 5. № 2 (10). С. 10-25.
- Ciais P., Canadell J., Luyssaert S. et al. 2010. Can we reconcile atmospheric estimates of the Northern terrestrial carbon sink with land-based accounting? // Current Opinion in Environmental Sustainability. V. 2. P. 225-230.
- Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D. et al. 2012. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. V. 9. P. 5323-5340.
- Global Carbon Project. 2011. Carbon budget and trends 2010 <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>

- Gurney K.R., Law R.M., Dennig A.S. et al. 2003. TranCom3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information // *Tellus B.* V. 55. P. 555-579.
- Houghton R.A., Davidson E.A., Woodwell G.M. 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance // *Global Biochem. Cycles.* V. 12. No. 1. P. 25-34.
- Ito A. 2003. A global scale simulation of the CO₂ exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere with a mechanistic model including stable carbon isotopes, 1953-1999 // *Tellus B.* V. 55. P. 596-612.
- Kurganova I. 2003. Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems. Interim Report, IR-02-070 Laxenburg, Austria: IIASA. 64 p. (Available: www.iiasa.ac.at)
- Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. 2010. Updated estimate of carbon balance on Russian Territory // *Tellus B.* V. 62. P. 497-505.
- Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A. et al. 2015. Soil contribution to carbon budget of Russian forests // *Agricultural and Forestry Meteorology.* V. 200. P. 97-108.
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. et al. 2000. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Laxenburg, Austria: IIASA. 180 p. (Available: <http://www.iiasa.ac.at>).
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J. et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science* V. 19. P. 988-993.
- Shvidenko A., Schepachenko D., Dolman H. 2011. Full carbon account for Russia // Abstract booklet of GEO-Carbon Conference "Carbon in a changing world". Rome, Italy, 24-26 October. P. 17.

Поступила в редакцию: 29.06.2015