ДИНАМИКА КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ ТУНДРОВОЙ И ЛЕСОТУНДРОВОЙ ЗОН РОССИИ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ВОЗДЕЙСТВИИ ОЛЕНЕВОДСТВА

Н.Н. Завалишин, Л.Л. Голубятников, Г.Г. Александров

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва nickolos@ifaran.ru

Аннотация. Трехблоковая схема круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре используется в качестве эталонной для построения его динамической модели для экосистем тундровой и лесотундровой зон России на пространственной сетке 0,5° × 0,5°. Калибровка модели в каждой пространственной ячейке обеспечивается биологическими (величины фитомассы, мортмассы, почвенного органического вещества, первичной продуктивности) и климатическими данными (среднегодовая температура воздуха, годовая сумма осадков, суммарная солнечная радиация) в начальный момент моделирования 1980 г. С использованием данных реанализа ERA-5 получены распределения запасов и потоков углерода в экосистемах тундровой и лесотундровой зон при современных изменениях климата к 2020 г. Значения климатических параметров на каждом годовом шаге подставлялись в динамическую модель круговорота углерода в каждой пространственной ячейке. Оценены изменения этих распределений при учете влияния оленеводства.

Ключевые слова: экосистема, биологический круговорот, динамическая модель, климатический сценарий.

Трехкомпартментальная модель углеродного цикла в тундровых и лесотундровых экосистемах: состояния и устойчивость при климатических и антропогенных воздействиях. Пулами трехкомпартментальной модели углеродного цикла в тундровых и лесотундровых экосистемах являются содержания углерода в живой фитомассе (C_1) , в мертвой фитомассе (подстилка, мертвые корни, дебрис) (C_{2}), в почвенном органическом веществе (ПОВ) (C₃) (рис. 1). Пул фитомассы C₁ поглощает углекислый газ атмосферы в ходе фотосинтеза, выделяет его в ходе автотрофного дыхания, и их разность составляет чистую первичную продукцию (NPP). Она распределяется между приростом фитомассы, поглощением и отчуждением ее растительноядными животными (выходной поток y_1), опадом и отпадом (поток f_{12}). Выходные потоки пулов мертвой фитомассы С, и ПОВ состоят из почвенной эмиссии углерода (y_{21} и y_{31}) и экспорта в соседние экосистемы (y_{22} и y_{32}). Поток f_{23} обеспечивается транспорт органики из органических остатков разных типов в ПОВ. Потоки q_2 и q_3 обозначают пополнение содержания углерода в резервуарах мортмассы и ПОВ за счет выпадения из атмосферы и переноса из соседних экосистем. Блоковая схема рисунка 1 применяется для создания динамической модели в каждой ячейке пространственной сетки $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ по широте и долготе, которой приписан тип конкретной тундровой или лесотундровой экосистемы согласно карте растительности [1] (рис. 2).



Рис. 1. Агрегированная до трех пулов статическая схема круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре п-ва Таймыр [2] (пулы – гС/м², потоки – гС/м²/год)

Поскольку данных для построения блоковой схемы в каждой пространственной ячейке не хватает, для вычисления недостающих значений потоков применяется схема круговорота в эталонной экосистеме мохово-кустарничковой тундры из работы [2]. Балансовая динамическая модель круговорота углерода для этой схемы имеет общий вид:



Рис. 2. Карта тундровой и лесотундровой зон России на пространственной сетке $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = NPP - y_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = q_2 + f_{12} + y_{21} - y_{22} - f_{23}. \\ \frac{dC_3}{dt} = q_3 - y_{31} - y_{32} + f_{23} \end{cases}$$
(1)

Часть потоковых функций зависит от содержания углерода в посылающем пуле линейно (донорный тип потока), что отвечает биологическим представлениям об их функционировании. Донорными потоками являются опад и отпад (f_{12}), почвенная эмиссия углерода (y_{21}, y_{31}), потребление и отчуждение фитомассы животными (у,), экспорт в соседние экосистемы со стоком (y_{22}, y_{32}) , транспорт углерода из органических остатков в ПОВ (f_{22}). Это значит, что можно принять некоторые из них в линейной форме: $f_{12}=\mathfrak{a}_{12}\mathbf{C}_{1}, f_{23}=\mathfrak{a}_{23}\mathbf{C}_{2}, y_{1}=m_{1}\mathbf{C}_{1},$ $y_{22} = m_2 C_2$, $y_{32} = m_3 C_3$. Функция продуктивности растительного покрова (NPP) учитывает влияние основных физических и биологических факторов, таких как количество фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) Q (МДж/м²/год); среднегодовая температура приземного воздуха T_a (°K); годовая сумма осадков Р (мм); концентрация СО, в приземном слое атмосферы в единицах углерода C_a ; фитомасса C_1 (гС/м²). Продуктивность представлена в мультипликативной форме:

$$NPP = \frac{p_0}{1 + p_1 c_1} \psi_1(C_a, T_a, P) \psi_2(Q), \quad (2)$$

где присутствуют два фактора: зависимость от атмосферных параметров ψ_1 и функция ФАР ψ_2 . Первый задается в мультипликативной форме:

$$\psi_{1}(C_{a}, T_{a}, P) = \frac{k_{T}(T_{a} - T_{\min})(T_{\max} - T_{a})}{(T_{\max} - T_{\min})^{2}} \times C_{a}k_{H}(1 - \exp(-\beta_{p}P)), \qquad (3)$$

где T_{max} и T_{min} – максимальное и минимальное значения температуры приземного воздуха [5], зависимость от годовой суммы осадков заимствована из работы [6], а второй имеет простую экспоненциальную форму с насыщением [4]:

$$\psi_2(Q) = 1 - \exp(-\beta_R Q). \tag{4}$$

Почвенная эмиссия углерода характеризует интенсивность процессов разложения мертвой фитомассы и почвенного органического вещества. Поэтому они зависят не только от среднегодовой приземной температуры воздуха, но и от количества осадков. Зависимость от температуры опирается на экспоненциальное уравнение Аррениуса [8], а для осадков используется зависимость с насыщением по примеру модели Райха – Поттера [9]:

$$\varphi_i(T_a, H) = k_i^D P \exp(k_i^a T_a) (k_i^P + P), \quad i = 2, 3 \quad (5)$$

Такая форма обусловлена тем, что чем выше количество осадков, тем больше влаги в почве и слабее процесс разложения, а при высоком количестве осадков тундра заболачивается и разложение переходит преимущественно в анаэробную стадию. Факторы ϕ_i действуют для потоков y_{21} и y_{31} , соответствующих разложению мортмассы и ПОВ.

Результатом сделанного выбора потоковых зависимостей является трехкомпартментальная динамическая модель круговорота углерода для каждой пространственной ячейки тундровой и лесотундровой зон:

$$\begin{cases}
\frac{dC_1}{dt} = C_1 \frac{p_0}{1 + p_1 C_1} \psi_1(C_a, T_a, P) \psi_2(Q) - (m_1 + \alpha_{12}) C_1 \\
\frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12} C_1 - m_2 C_2 + \alpha_{23} C_2 - C_2 \varphi_2(T_a, P). \\
\frac{dC_3}{dt} = q_3 + m_3 C_3 + \alpha_{23} C_2 - C_3 \varphi_3(T_a, P)
\end{cases}$$
(6)

В системе (6) есть стационарная точка с нулевой фитомассой:

$$C^{(1)} = [0; q_2/(m_2 + \alpha_{23} + \varphi_2); q_3/(m_3 + \varphi_3)],$$

и одно полное стационарное состояние:

$$C^{(2)} = \left[\frac{1}{p_1} \left(\frac{p_0 \psi_1 \psi_2}{m_1 + \alpha_{12}} - 1\right);\right]$$
$$\left(q_2 + \frac{\alpha_{12}}{p_1} \left(\frac{p_0 \psi_1 \psi_2}{m_1 + \alpha_{12}} - 1\right)\right) / (m_2 + \alpha_{23} + \varphi_a);\right]$$
$$\left(q_3 + \alpha_{23} C_2^{(2)}\right) / (m_3 + \varphi_3)].$$

Условия их асимптотической устойчивости легко определяются из разложимой матрицы Якоби:

$$-m_{3} - \varphi_{3} < 0; -m_{2} - \alpha_{23} - \varphi_{2} < 0;$$

$$\frac{p_{0}\psi_{1}\psi_{2}}{\left(1 + p_{1}C_{1}^{*}\right)^{2}} - m_{1} - \alpha_{12} < 0 , \qquad (7)$$

и сводятся к условиям:

 $p_0\psi_1\psi_2 < m_1\alpha_{12}$ – устойчиво $C^{(1)}$, $p_0\psi_1\psi_2 > m_1 + \alpha_{12}$ – устойчиво $C^{(2)}$.

Последнее из них можно использовать для калибровки коэффициента p_0 , исходя из положения об устойчивости стационарного состояния круговорота в начальный момент времени перед стартом современных климатических изменений. В качестве начального момента на шкале времени принят 1980 год, по данным за который проводятся расчет начальной почвенной эмиссии и калибровка коэффициентов потоков. Начальными данными являются пространственные распределения фитомассы, первичной продуктивности, мортмассы и запасов органического вещества почв, подготовленные по данным Н.И. Базилевич [2] и Д.С. Орлова [3]. Климатический набор образован данными реанализа ERA-5 за период

с 1980 по 2020 г. для среднегодовой приземной температуры воздуха, годовых сумм осадков, суммарной солнечной радиации, минимальной и максимальной температур приземного воздуха.

Оценки современных пулов и потоков углерода в экосистемах тундровых и лесотундровых регионов России с учетом климата и оленеводства. Для учета влияния выпаса северных оленей в модель (7) введены три дополнительные потока углерода, которые дополняют углеродный обмен компартментов «живая фитомасса» и «мортмасса»: поток f_c соответствует потреблению оленями зеленой фитомассы, поток f_G – количеству вытаптываемой оленями фитомассы, поток q_A дополняет входной поток в мортмассу, обозначая углерод, поступающий с навозом оленей:

$$\frac{dC_1}{dt} = C_1 \frac{p_0}{1 + p_1 C_1} \psi_1 (C_a, T_a, P) \psi_2(Q) - (m_1 + \alpha_{12}) C_1 - f_C - f_G$$
$$\frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12} C_1 - m_2 C_2 - \alpha_{23} C_2 - C_2 \varphi_2(T_a, P) + f_G + q_A \cdot (8)$$
$$\frac{dC_3}{dt} = q_3 - m_3 C_3 + \alpha_{23} C_2 - C_3 \varphi_3(T_a, P)$$

Все дополнительные потоки прямо пропорциональны пересчитываемой на кв. м численности поголовья оленей N_y (тыс. голов) в пространственной ячейке в год 'y'. Поскольку по данным работы [10] один олень за летний сезон стравливает 2,5 т воздушно-сухой массы зеленых кормов, кормовая нагрузка (F_G) на растительный покров экосистем в год 'y' $F_G = 2,5 \cdot N_y$. Для оценки потерь запаса зеленой фитомассы от вытаптывания (U_G) предложена зависимость, прямо пропорциональная поголовью оленей (N_y) и обратно пропорциональная запасу кормов (G_y) в год 'y':

$$U_{G} = k_{U} \cdot N_{y} / G_{y},$$

где k_U – коэффициент пропорциональности. Величина коэффициента пропорциональности (k_U = 750) определена из соотношений вытоптанных и стравленных запасов кормов, а также из оценки запасов зеленых кормов. По данным работы [11], за летний сезон на одного оленя приходится 1,99 т навоза. Эта оценка принята для определения поступления углерода органического вещества в пул мортмассы рассматриваемых экосистем с навозом оленей в год 'y': F_D = 1,99 · N_v .

В ходе имитационных компьютерных расчетов вычислены как меридиональные, так и широтные распределения фитомассы, мортмассы,



Рис. 3. Широтное (*a*) и меридиональное (*б*) распределение фитомассы тундровых и лесотундровых экосистем России для 1980 и 2020 гг.

гумусовых веществ почвы, потоков первичной продуктивности (NPP) и почвенной эмиссии углерода (ПЭУ) как без учета воздействия оленеводства, так и с включением этого фактора для периода 1980–2020 гг.

Из графиков распределений фитомассы (рис. 3) следует, что климатические изменения за 40 лет значительно меньше сказались на запасе углерода в фитомассе, чем воздействие выпаса оленей. По широтному распределению видно, что на большинстве территорий тундровой и лесотундровой зоны изменение климата за 40 лет способствовало небольшому приросту фитомассы. В самых северных широтах (77-81,5° с.ш.), где оленей практически нет, изменение фитомассы не отличается от климатически обусловленного, в самых южных (62-63° с.ш.) это изменение намного меньше, чем в промежутке 64-77° с.ш., на котором включение воздействия выпаса через выедание зеленой части и вытаптывание привело к значительному снижению запаса углерода в фитомассе (до 50 % на некоторых участках). Наибольшее сокращение фитомассы в результате выпаса характерно для полосы от Большеземельской тундры до восточной оконечности п-ва Таймыр, что отвечает факту более высокой средней численности оленей на этой территории по сравнению с остальными территориями тундровой и лесотундровой зоны.

Воздействие выпаса уменьшает запас углерода в мортмассе, однако в южной части зоны его дополнительный приток с навозом в подстилку почти компенсирует эти потери (рис. 4). Максимальное уменьшение мортмассы при оленеводстве характерно для диапазона 69–74° с.ш.: на 100–150 гС/м²/год по сравнению с 2020 г. (только климатическое воздействие на экосистемы) и на 500-600 гС/м²/год по сравнению с 1980 г. Из широтного распределения первичной продуктивности (рис. 5а) следует, что в интервале 64-74° с.ш. первичная продуктивность уменьшилась при выпасе оленей, по сравнению с величиной, обусловленной изменениями климата, на 30-50 гС/м²/год, но превосходит начальный уровень 1980 г. в интервале 63,5-64,5° с.ш. тундровой и лесотундровой зоны. Изменение климата способно уменьшить интенсивность почвенной эмиссии углерода (ПЭУ) к 2020 г. за счет увеличения количества осадков, а учет влияния оленеводства эту величину повышает за счет притока дополнительного органического вещества (рис. 6). В диапазоне 62-63,5° с.ш. изменение климата повысило уровень ПЭУ 20-50 гС/м²/год, а воздействие оленеводства повышает его еще на 5-60 гС/м²/год. Меридиональное распределение ПЭУ (рис. 6б) показывает, что выпас оленей повышает почвенную эмиссию углерода в экосистемах. Максимально ПЭУ возрастает за счет воздействия оленеводства в полосе 50-120° в.д. на 200-250 гС/м²/год в районе п-ва Ямал и Западного Таймыра, на 100-150 гС м²/год в восточной части Таймыра.

Характеристикой углеродного обмена экосистемы с атмосферой является чистая экосистемная продуктивность (NEP), равная разности NPP и почвенной эмиссии. Карта изменения NEP в тундровых и лесотундровых экосистемах России за изучаемый период приведена на рисунке 7. В отличие от значений NEP на 2020 г., величины изменения NEP на всем исследуемом пространстве северных регионов России отрицательное. Это означает, что в результате изменений климата



Рис. 4. Широтные распределения мортмассы (*a*) и почвенного органического вещества (ПОВ) (*b*) тундровых и лесотундровых экосистем России для 1980 и 2020 гг.



Рис. 5. Широтное (*a*) и меридиональное (*б*) распределения первичной продуктивности тундровых и лесотундровых экосистем России для 1980 и 2020 гг.



Рис. 6. Широтное (*a*) и меридиональное (*б*) распределения гетеротрофного дыхания тундровых и лесотундровых экосистем России для 1980 и 2020 гг.

за 40 лет гетеротрофное дыхание в изучаемых экосистемах росло несколько интенсивнее, по сравнению с увеличением первичной продуктивности, что привело к сокращению поглощающей способности тундровых и лесотундровых экосистем.

На рисунке 8 показано пространственное распределение суммарных изменений общего запаса углерода экосистем (фитомасса + мортмасса + органическое вещество почвы) рассматриваемого региона за изучаемый период. Общий запас углерода в экосистемах уменьшился в экосистемах всего арктического побережья России, а его прирост характерен для континентальных областей. Прирост суммарного запаса в 2020 г. превышал потери, что особенно заметно по расчетам для лесотундровых экосистем.



Рис. 7. Расчетное изменение NEP (гС/м²) в тундровых и лесотундровых экосистемах России за 1980–2020 гг.



Рис. 8. Расчетное изменение суммарного запаса углерода по всем пулам (гС/м²) в тундровых и лесотундровых экосистемах России за 1980–2020 гг.

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).

Список литературы

1. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М., Наука, 1993.

2. Базилевич Н.И., Гильманов Т.Г. Концептуально-балансовые модели экосистем как этап обобщения экологической информации при построении математических моделей // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. VII. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. С. 152–178.

3. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 4. Ольчев А.В. Модельный подход к определению валовой и нетто первичной продукции лесных экосистем по величине поглощенной фотосинтетически активной радиации // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 345–353.

5. *Svirezhev Yu., von Blo W.* Climate, vegetation and global carbon cycle: the simplest zero-dimensional model // Ecological Modelling. 1997. Vol. 101. P. 79–95.

6. *King A.W., Post W.M., Wullschleger S.D.* The potential response of terrestrial carbon storage to change in climate and atmospheric CO, // Climatic Change. 1997. Vol. 35. P. 199–227.

7. Post W.M., King A.W., Wullschleger S.D. Historical variations in terrestrial biospheric carbon storage // Global Biogeochemical Cycles. 1997. Vol. 11. No. 1. P. 99–109.

8. Adams B., White A., Lenton T.M. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity // Ecological Modelling. 2004. No. 177. P. 353-391.

9. Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina N., Reichstein M. Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled by using a global database // Biogeosciences. 2015. No. 12. P. 4121-4132.

10. Кряжимский Ф.В., Маклаков К.В., Морозова Л.М., Эктова С.Н. Системный анализ биогеоценозов полуострова Ямал: имитационное моделирование воздействия крупностадного оленеводства на растительный покров // Экология. 2011. № 5. С. 323–333.

11. Смирнов П.М., Муравин Э.А. Агрохимия. М.: Колос, 1984. 304 с.

CARBON TURNOVER DYNAMICS IN ECOSYSTEMS OF TUNDRA AND FOREST-TUNDRA ZONES OF RUSSIA UNDER THE CURRENT CLIMATE CHANGE AND REINDEER HERDING IMPACT

N.N. Zavalishin, L.L. Golubyatnikov, G.G. Alexandrov

A.M. Obukhov Institute of atmospheric physics, Russian Academy of Sciences, Moscow nickolos@ifaran.ru

Abstract. Three-compartment static scheme of carbon turnover in the shrub-moss tundra is used as the template for designing its dynamic model for ecosystems of tundra and forest tundra zones in Russia on the spatial grid $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. The model calibration in each spatial cell is provided by biological (phytomass, mortmass, soil organic carbon, net primary productivity) and climatic (annual surface air temperature, total precipitation, total shortwave solar radiation) data in initial time moment of modelling in 1980. Using ERA-5 re-analysis distributions of carbon pools' storages and flows in tundra and forest tundra ecosystems under the current climate change till 2020 are obtained. Climate parameters at each annual time step were substituted in the carbon turnover dynamic model in each spatial cell. Also estimated are changes of these distributions under reindeer herding impact.

Keywords: ecosystem, biological turnover, primary productivity, dynamic model, climatic scenario.

References

1. Bazilevich N.I. 1993. Biological productivity of ecosystems in Northern EuroAsia. Moscow, Nauka Publishers. (In Russian with English summary).

2. Bazilevich N.I., Gil'manov T.G. 1985. Concept balance ecosystem models as a stage in generalizing ecological information upon mathematical models design. In: *Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling*. Vol. VII. Leningrad, Gidrometeoizdat Publishers: 152–178. (In Russian with English summary).

3. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. 1996. *Organic* matter of soils in Russian Federation. Moscow, Nauka Publishers. (In Russian).

4. Olchev A.V. 2016. A modeling approach to estimate the gross and net primary production of forest ecosystems as a function of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation. *Computer Research and Modeling.* 8(2): 345–353.

5. Svirezhev Yu., von Blo W. 1997. Climate, vegetation and global carbon cycle: the simplest zero-dimensional model. *Ecological Modelling*. 101: 79–95. 6. King A.W., Post W.M., Wullschleger S.D. 1997. The potential response of terrestrial carbon storage to change in climate and atmospheric CO₂. *Climatic Change*. 35: 199–227.

7. Post W.M., King A.W., Wullschleger S.D. 1997. Historical variations in terrestrial biospheric carbon storage. *Global Biogeochemical Cycles*. 11(1): 99–109.

8. Adams B., White A., Lenton T.M. 2004. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity. *Ecological Modelling*. 177: 353–391.

9. Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina N., Reichstein M. 2015. Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled by using a global database. *Biogeosciences*. 12: 4121–4132.

10. Kryazhimskiy F.V., Maklakov K.V., Morozova L.M., Ektova S.N. 2011. System analysis of biogeocenoses of the Yamal Peninsula: simulation of the impact of large-herd reindeer breeding on vegetation. *Ekologiya (Russian Journal of Ecology)*. 5: 323–333.

11. Smirnov P.M., Muravin E.A. 1984. Agrokhimiya. [Agrochemistry]. Moscow; Kolos: 304 p.