ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОДУКЦИОННОЙ И ДЕСТРУКЦИОННОЙ ВЕТВЕЙ БИОТИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Н.Н. Завалишин

Лаборатория математической экологии, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
19017, Москва, Пыжевский пер., 3.
nickolos@ifaran.ru

Биотический круговорот в наземных экосистемах состоит из продукционной и деструкционной ветвей, каждая из которых играет свою роль в трансформации вещества и энергии. Главным элементом продукционной ветви является растительный покров, осуществляющий фотосинтез нового живого органического вещества (ЖОВ), а в деструкционной – мертвое органическое вещество (МОВ), разложение которого организмами-деструкторами обеспечивает возврат элементов в почву и эмиссию углеродсодержащих газов в атмосферу. Поэтому самыми элементарными моделями биотического круговорота можно считать двухкомпонентные схемы с ЖОВ и МОВ в качестве фазовых переменных, скорости изменения которых определяются разностью входящих и выходящих потоков. На рис. 1 изображена простейшая двухкомпонентная схема круговорота углерода с резервуарами, соответствующими растительности и отмершему органическому веществу (ОВ) почвы, а схема на рис. 2 включает ЖОВ, состоящее не только из растительности, но и животных, микроорганизмов, грибов, как потребляющих растения, так и разлагающих МОВ. Потоки ОВ отражают основные процессы, слагающие углеродный цикл наземных экосистем: первичную продуктивность растительного покрова (NPP), опад, разложение растительных остатков микроорганизмами и животными, привнос и вынос углерода, в т.ч. с поверхностными водами. Входной поток мертвого ОВ предполагается постоянным, поскольку определяет поступление органического вещества из соседних экосистем. В схеме рис. 2 поток f_{21}^c отражает потребление мертвого ОВ организмами-разлагателями, а эмиссию углерода вследствие его разложения символизирует поток гетеротрофного дыхания y_{11}^c . В схеме рис. 1 эта эмиссия идет в атмосферу непосредственно из блока мертвого ОВ. Т.о., поток f_{21}^c обозначает своеобразную обратную связь в двухкомпонентных моделях. Поэтому анализ моделей, построенных на обеих схемах, может помочь выяснить разницу в динамическом поведении биотического круговорота с наличием

обратной связи по углероду и без неё.

Для калибровки коэффициентов потоковых функций по углероду взяты агрегированные среднегодовые схемы круговорота в типичных наземных экосистемах Северной Евразии из работ [1–3]: мохово-кустарничковая тундра, еловый лес южной тайги, осоково-снытевая дубрава лесостепи, луговая степь (Европейская территория России), ряд типов болот и сосновый лес (Западная и Восточная Сибирь). Различия в функционировании круговорота в значительной степени обусловлены разницей в климатических условиях, поскольку потоки зависят от среднегодовой температуры воздуха и суммы осадков. Поэтому одна из целей работы состоит в сравнении динамики круговорота в экосистемах различных природно-климатических зон при вероятных изменениях климата.

Отличаясь всего одним потоком, динамические модели круговорота углерода для рис. 1 и 2 приобретают вид:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = C_1(\varphi_1(C_1) - m_1 - \alpha_{12}) \\ \frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12}C_1 - m_2C_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = C_1(\varphi_1(C_1) - m_1 - \alpha_{12} + \gamma_{21}C_2) \\ \frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12}C_1 - m_2C_2 - \gamma_{21}C_1C_2 \end{cases} \quad (2)$$

где C_i – запасы углерода в пулах экосистемы (гС/м^2), q_i – входные потоки из соседних экосистем, $NPP = C_1\varphi_1(C_1)$ – чистая первичная продукция ($\text{гС/м}^2/\text{год}$), межблоковые потоки опада и отмирания имеют донорный тип с коэффициентом α_{12} , дыхание и разложение линейны по запасу с коэффициентом m_i , а поток потребления на рис. 2 имеет тип Лотки-Вольтерры $\gamma_{21}C_2C_1$. Главным источником нелинейности в обеих блоковых моделях является зависимость первичной продукции растительности от фитомассы на среднегодовом масштабе времени. Она определяется рациональной функцией на основе существующих баз данных [3] и значениями ЧПП в измеренных состояниях равновесия, которыми служат статические схемы круговорота. Помимо

этого продуктивность зависит от годовой суммы осадков P , среднегодовой приземной температуры воздуха T_a и концентрации в атмосфере C_a . Первая из них линейна, вторая унимодальна, а третья представляет собой функцию с насыщением. Интенсивность разложения МОВ также зависит

от среднегодовой приземной температуры воздуха и суммы осадков линейно. Эти параметризации позволяют исследовать реакцию углеродного цикла наземных экосистем на внешние воздействия в терминах интенсивностей функционирования его продукционной и деструкционной ветвей.

Рис. 1. Агрегированная двухкомпонентная модель биотического круговорота углерода в наземных экосистемах без обратной связи.

Запасы: C_1 – растительность, C_2 – опад, отпад, подстилка и органическое вещество корнеобитаемого слоя почвы (МОВ).

Потоки: ΔC_1 – закрепление в истинном приросте, q_1 – ассимиляция CO_2 из атмосферы растениями в ходе фотосинтеза, q_2 – привнос мертвого органического вещества (МОВ) из соседних экосистем (отсутствует для олиготрофных болот), y_1 – автотрофное дыхание и потребление фитофагами из других экосистем, y_{21} – вынос МОВ со стоком и абиотическое окисление, y_{22} – разложение МОВ, y_{23} – торфообразование (для болот), f_{12} – опад и отпад, f_{21} – разложение МОВ (обратная связь).

Рис. 2. Агрегированная двухкомпонентная модель биотического круговорота углерода в наземных экосистемах с обратной связью.

Запасы: C_1 – ЖОВ, C_2 – опад, отпад, подстилка и органическое вещество корнеобитаемого слоя почвы (МОВ).

Изучение зависимости ЧПП от фитомассы в наземных экосистемах для полярного, бореального, умеренного и субтропического климатических поясов Северной Евразии по данным работ [3, 4] показывает, что её возможно аппроксимировать дробно-рациональной функцией либо II типа по Холлингу, либо III типа с локальным максимумом. Эти формы порождают различное число равновесий в моделях (1) и (2). Одно равновесие с нулевой первой компонентой существует в обоих типах моделей и соответствует предельному состоянию без ЖОВ в экосистеме. Возможны одно, два или три стационарных состояния с ненулевыми компонентами, которые являются решениями квадратного или кубического уравнения в зависимости от формы ЧПП и наличия обратной связи. Области их устойчивости на плоскости интенсивностей продуктивности ЖОВ и разложения МОВ могут пересекаться, образуя регионы мультистабильности. В модели

(1) колебательные режимы отсутствуют, а переходы между равновесиями обеспечиваются транскритическими и седло-узловыми бифуркациями. В модели (2) с обратной связью появляются бифуркации вилки, Андронова-Хопфа с возникновением автоколебаний и точка Богданова-Тakens с линией нелокальной бифуркации исчезновения предельного цикла. Одной из основных кривых на параметрическом портрете является линия транскритической бифуркации равновесий с ненулевыми компонентами, которая отделяет область преобладания продуктивной ветви круговорота над деструкционной от области, где интенсивность разложения выше скорости продукции. В каждой из областей устойчивыми могут быть как равновесия, так и колебательные режимы в случае их наличия, а переходы между ними соответствуют эволюции экосистем при изменении обоих параметров, зависящих от климатических характеристик. Нахождение кругово-

рота в области преобладания продукционной ветви означает стабильную эволюцию экосистемы, даже если режим функционирования постепенно меняется, а попадание в область преобладания деструкционной создает риск деградации экосистемы до состояния без ЖОВ.

Моделирование последствий изменений климата осуществлено с помощью климатических проекций нескольких глобальных климатических моделей, основанных на двух сценариях RCP антропогенных выбросов в атмосферу в ближайшие 100 лет – «жестком» RCP-8.5 и «мягком» RCP-2.6. Сценарий сильной нагрузки RCP-8.5 ведет к существенному повышению среднегодовой температуры и содержания углекислого газа в атмосфере, что стимулирует рост растительности, но в ряде регионов Европейской территории России и Западной Сибири способствует уменьшению годовой суммы осадков. Поэтому в зону риска деградации с преобладанием деструкционного процесса попадают экосистема промежуточной природной зоны – дубрава лесостепи, а также еловый лес подзоны южной тайги и луговая степь, подверженная опустыниванию. Общий тренд изменения болотных ландшафтов при

сильной климатической нагрузке также направлен на переход облесенных болот к состоянию топей разных типов. При относительно мягком сценарии изменения среднегодовой температуры и суммы осадков RCP-2.6 имеет место иная эволюция круговорота, поскольку преобладает продукционная ветвь, биомасса живого органического вещества растёт, топяные болотные ландшафты переходят в категорию лесных, а мохово-кустарничковая тундра может стать лесотундрой. Однако для почти всех рассмотренных экосистем преобладание продукционной ветви слабое, в ряде случаев характерен переход круговорота в колебательный режим вблизи бифуркационной границы преобладания продукционной и деструкционной ветвей.

Работа выполнена при поддержке темы № АААА-А18-118032090072-9 государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН и крупного проекта КП19-278 («Новые вызовы климатической системы Земли») по проведению фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым президиумом Российской академии наук.

Список литературы:

1. Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А., Географические особенности структуры и функционирования экосистем. – М., Наука, 1986, 297 с.
2. Базилевич Н.И., Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М., Наука, 1993, 296 с.
3. Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в наземных экосистемах. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 381 с.
4. Усольцев В.А., Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). – Екатеринбург, УГЛУ, 2016, 383 с.
5. Калужный И.Л., Лавров С.А., Сезонная эмиссия двуокиси углерода в засушливый год на олиготрофном болотном массиве северо-запада России. // Метеорология и гидрология, 2005, № 10, с. 81–93.

TWO-COMPONENT DYNAMIC MODELS FOR PRODUCTIVE AND DESTRUCTIVE BRANCHES OF BIOTIC TURNOVER IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF NORTHERN EUROASIA

N.N. Zavalishin

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

Abstract – Aggregated two-component static schemes of biological turnover in typical terrestrial ecosystems of Northern Euroasia are designed to be data source for dynamic models. Among them there are moss-shrub tundra, spruce forest in southern taiga, sedge-goutweed oak forest in forest-steppe zone, meadow steppe (all – in the European territory of Russia), a number of peatland types and pine forest (Western and Eastern Siberia). The models are calibrated by the turnover static schemes corresponding to its several observed states. Stability conditions and bifurcations of steady states are studied depending on the Net Primary Production (NPP) functional form. This dependence on phytomass determines the number of equilibria as well as their bifurcations under parameters change. Intensities of productivity and destruction serve bifurcation parameters for parametric portraits of dynamic models. Model coefficients are then parameterized through climatic characteristics (mean annual near-surface air temperature and total precipitation). The parameterization allows one to obtain carbon storages evolution projections under climate change scenarios and accompanying increase of atmospheric carbon dioxide. Numerical simulations with models are carried out under two projections of climate change by the IPSL model with anthropogenic emission scenarios RCP-2.6 and RCP-8.5. They show different reaction of carbon cycle to climate change in ecosystems situated in similar climatic zones.

Keywords: ecosystem, biological turnover, dynamic models, climate change scenario.

References:

1. Bazilevich N.I., Grebenshikov O.S., Tishkov A., Geographic peculiarities of ecosystem structure and functioning. – Moscow, Nauka, 1986, (in Russian).
2. Bazilevich N.I., Biological productivity of ecosystems in Northern Euroasia. – Moscow, Nauka, 1993, 296 p. (in Russian).
3. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems. – Novosibirsk, Publishing house SB RAS, 2008, 381 p. (in Russian).
4. Usoltsev V.A., Forest biomass and primary production database for EuroAsia, CD-version, Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University, 2013, <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>
5. Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A., Seasonal emission of carbon dioxide in a dry year from an oligotrophic bog in Northwestern Russia. // Meteorology and hydrology, 2005, № 10, c. 81–93 (in Russian).