1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.51:574.42

DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-15-20

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНО-АЗОТНОГО ЦИКЛА ТУНДРЫ В ГОЛОЦЕНЕ

М.М. Аржанов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
arzhanov@ifaran.ru

Аннотация. Проведены расчеты динамики углерода и азота в тундровых экосистемах северных регионов Западной Сибири с использованием резервуарно-поточковой модели, включающей растительность, органические соединения углерода, растворенный органический и неорганический азот. Показано, что тундровые экосистемы в пределах последних 10 тыс. лет в том числе, в условиях приповерхностного потепления с увеличением зимней температуры и незначительными изменениями летней температуры могли накапливать органическое вещество, поглощая углерод-содержащие парниковые газы из атмосферы.

Ключевые слова: тундровые экосистемы, динамические модели, углеродно-азотный цикл

Для исследования влияния климатических изменений на естественные эмиссии парниковых газов в атмосферу необходим адекватный учет углеродного баланса природных экосистем. Наблюдаемое повышение приповерхностной температуры, наиболее значительное в высоких широтах Северного полушария, в том числе в регионах тундры, может вызвать деградацию многолетнемерзлых пород [1–3] и увеличение эмиссии парниковых газов [4]. Оценки запасов углеродного субстрата, сформировавшегося в межледниковые периоды и законсервированного в мерзлоте, которые могут быть включены в глобальный биогеохимический цикл в результате оттаивания к концу XXI в. на основе данных полевых измерений и результатов численного моделирования при различных сценариях антропогенных воздействий (SRES, RCP) составляют от 50–100 Гт С [5, 6] до 170–300 Гт С и более [7, 8]. С другой стороны, прогнозируемое повышение температуры грунта [9] и поступление биогенных элементов, в частности, азота, вызванное разложением оттаявшего органического вещества, может вызвать дополнительный рост растений и увеличить поглощение углекислого газа наземными экосистемами [10, 11]. Учитывая значительный разброс имеющихся экспериментальных и модельных данных и наличие неопределенности в роли тундровых экосистем, которые могут являться как источником так и стоком углеродсодержащих газов [11, 12], а также принимая во внимание, что возможные траектории отклика характеристик наземного углеродного цикла на изменения климата зависят от взаимодействия с азотным циклом [7, 13–15], важной задачей явля-

ется оценка изменения характеристик круговоротов углерода и азота в тундровых экосистемах в зависимости от климатических условий.

Расчеты динамики углерода и азота в тундровых экосистемах проводились с использованием резервуарно-поточковой модели [16], включающей растительность, органические соединения углерода, растворенный органический и неорганический азот. Органические соединения почвы включают в себя азот детрита и азот гумуса. Неорганический азот представлен нитратными и аммонийными соединениями. Модель описывает наиболее существенные процессы трансформации соединений углерода и азота и потоки этих соединений между наземными экосистемами и атмосферой. В том числе в модели учитываются процессы поступления азота в экосистему из атмосферы, потребление растительностью доступного азота из почвы, отмирание растительности, гумификация, минерализация органического азота почвы, потребление растительностью аммонийных соединений и нитратов, выщелачивание аммония и нитратов в почве. Интенсивности потоков азота между пулами зависят от содержания азота и углерода в них и соотношения C:N в соответствующих пулах. Для описания динамики азота в рассматриваемых пулах в модели использованы дифференциальные уравнения балансового типа.

Анализ динамики пулов экосистемы в моделях круговорота дает возможность проследить характер взаимосвязи углеродный цикл – климат при тех вариациях параметров, которые инициированы климатическими изменениями. В качестве таких параметров в работе использовались интенсивность потребления

растительностью доступного азота из почвы и интенсивность разложения органического вещества в зависимости от приповерхностной температуры [17], с характерными значениями скоростей реакций для тундровой зоны Западной Сибири [18–21]. Температурная чувствительность скорости разложения органического вещества почвы является ключевым параметром для прогнозирования изменения запасов углерода в почве в условиях глобального потепления. Органическое вещество почвы является основным пулом углерода, полученного из биосферы, который возвращается в атмосферу в основном за счет микробного разложения. Для оценки влияния климатических условий на азотно-углеродный цикл тундры в рассматриваемом регионе в пределах последних 10 тыс. лет был сформирован ряд приповерхностной температуры на основе аномалий среднемесячной температуры по расчетам с глобальной климатической моделью CLIMBER-2 [22] и климатологии за 1941–1960 гг. по данным реанализа CERA-20C (рис. 1). Согласно модельным оценкам за период 10–5.5 тыс. лет назад в данном регионе отмечается рост среднегодовой температуры воздуха с уменьшением амплитуды годового хода за счет повышения зимних температур.

Рис. 1. Приповерхностная температура в тундровых регионах Западной Сибири в пределах последних 10 тыс. лет на основе аномалий температуры по расчетам с моделью CLIMBER-2 и климатологии за 1941–1961 гг. по данным реанализа CERA-20C, в том числе среднегодовая температура (сплошная линия), температура в среднем за лето (пунктир) и амплитуда годового хода (серая область).

Рис. 2. Моделируемое содержание нитратной и аммонийной форм азота (а) и углерода (б) в почве в тундровых регионах Западной Сибири в пределах последних 10 тыс. лет.

Тренд модельной среднегодовой температуры воздуха составляет $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ лет}$. Уменьшение амплитуды годового хода – около $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменения средней за лето температуры незначительны. Температура в июне за этот период уменьшается. На протяжении последующих 5 тыс. лет среднегодовая температура воздуха в рассматриваемом регионе понижалась (тренд – $0.02\text{--}0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ лет}$) за счет понижения температуры в зимний период. Максимум модельной приповерхностной темпера-

туры около 5.5 тыс. лет назад в северных регионах Западной Сибири может быть связан с изменением ледовых условий. Анализ зонального распределения температуры показал, что для континентальных регионов этот эффект отсутствует.

С использованием температуры воздуха, осредненной за летний сезон, проведено моделирование динамики углерода и азота в тундровых экосистемах в пределах последних 10 тыс. лет (рис. 2). Предполагается, что современные запасы углерода и азота

в верхних горизонтах почвы в регионах Западной Сибири отражают динамику накопления после периода оледенения (около 18 тыс. лет назад) и последующего потепления (около 11 тыс. лет назад) [23]. Согласно результатам расчетов запасы углерода в почве возрастают на протяжении рассматриваемого периода.

Рассчитанные значения углерода в почве для современных климатических условий составляют 14700 гС/м^2 , что согласуется с данными наблюдений, в частности, для п-ва Ямал $13810\text{--}30390 \text{ гС/м}^2$ [18]. Запасы нитратной и аммонийной форм азота стабилизируются в начале расчетного периода. Также следует отметить отклик этой составляющей азотного пула на повышение температуры около 5.5 тыс. лет назад.

Учет взаимодействия углеродного и азотного циклов в тундровых экосистемах показал, что в голоцене в связи с характерной структурой при-

поверхностного потепления с увеличением зимней температуры и незначительными изменениями летней температуры возможно накопление углерода в почве. Это соответствует случаю, когда потребление атмосферного углерода развивающимся растительным покровом не только компенсирует, но может превышать эмиссию почвенного углерода. По этой причине в результате потепления тундровые экосистемы могут служить стоком углерода. Таким образом, в случае учета углеродно-азотной взаимосвязи глобальное потепление может способствовать накоплению запасов углерода в тундровых экосистемах. При этом взаимосвязь углеродный цикл – климат может стать отрицательной.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ (18-05-60111, 19-05-00409), анализ приповерхностной температуры выполнен в рамках проекта РНФ № 19-17-00240.

Список литературы

1. Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки на основе климатической модели ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 291–304.
2. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI веке по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С.31–42.
3. Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 3. С. 37–42.
4. Plaza C., Pegoraro E., Bracho R. et al. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra // Nat. Geosci. 2019. Vol. 12. pp. 627–631.
5. Jobbagy E.N., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // Ecol. Appl. 2000. Vol. 10. No 2. P. 423–436.
6. Аржанов М.М., Мохов И.И. Модельные оценки количества органического углерода, освобождаемого из многолетнемерзлых грунтов при сценариях глобального потепления в XXI веке // Доклады АН. 2014. Т. 455. № 3. С. 328–331.
7. Schuur E., McGuire A., Schadel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520. P. 171–179.
8. Kleinen T., Brovkin V. Pathway-dependent fate of permafrost region carbon // Environ. Res. Lett. 2018. Vol. 13. No. 094001. P. 1–8.
9. Аржанов М.М., Мохов И.И. Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: Сравнение модельных расчетов с данными наблюдений // Доклады АН. 2013. Т. 449. № 1. С.87–92.
10. Stieglitz M., Giblin A., Hobbie J., Williams M., Kling G. Simulating the effects of climate change and climate variability on carbon dynamics in Arctic tundra // Global biogeochemical cycles. 2000. Vol. 14, No. 4, P. 1123–1136.
11. Maslov M.N., Makarov M.I. Organic matter of the soil of the mountain tundra in north fennoscandia // Moscow University Soil Science Bulletin. 2013. Vol. 68. No. 3. P. 99–103.
12. Houweling S., Kaminski T., Dentener F. et al. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. No. D21. P. 26137–26160.
13. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеев А.В. Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 255–270.
14. Arora V.K., Scinocca J.F., Boer G.J. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. No. 5. P. 1–6.
15. Zavalishin N.N. Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems // Ecological Modelling. 2008. Vol. 213. P. 16–32.
16. Stieglitz M., McKane R.B., Klausmeier C.A. A simple model for analyzing climatic effects on terrestrial carbon and nitrogen dynamics: An arctic case study // Global biogeochemical cycles. 2006. Vol. 20. P. 1–11.

17. *Waelbroeck C., Louis J.-F.* Sensitivity analysis of a model of CO₂ exchange in tundra ecosystems by the adjoint method // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 10. No. D2. P. 2801–2816.
18. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
19. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Баланс углерода в тундре в условиях современного климата: роль подземной составляющей чистой продукции экосистемы // *Доклады АН.* 2014. Т. 458. № 2. С. 243–245.
20. *Qin S., Chen L., Fang K., Zhang Q., Wang J., Liu F., Yu J., Yang Y.* Temperature sensitivity of SOM decomposition governed by aggregate protection and microbial communities // *Sci. Adv.* 2019. Vol. 5. No. 1218. P. 1–9.
21. *Palmer C.A., Markstein K.P., Tanner L.H.* Experimental test of temperature and moisture controls on the rate of microbial decomposition of soil organic matter: preliminary results // *Aims Geosciences.* 2019. Vol. 5. No. 4. pp. 886–898.
22. *Ganopolski A., Calov R., Claussen M.* Simulation of the last glacial cycle with a coupled climate ice-sheet model of intermediate complexity // *Clim. Past.* 2010. Vol. 6. pp. 229–244.
23. *Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T.* The influence of climate on peatland extent in Western Siberia since the Last Glacial Maximum // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. No. 24784. pp. 1–6.

MODELING OF THE CARBON AND NITROGEN CYCLES OF TUNDRA IN THE HOLOCENE

M.M. Arzhanov

A.M. Obukhov Institute of atmospheric physics, RAS

arzhanov@ifaran.ru

Abstract. The observed increase in near-surface temperature can cause degradation of permafrost and an increase in greenhouse gas emissions. At the same time, the productivity of the tundra increases, and more intense photosynthesis means an increase in the absorption of carbon from the atmosphere. Therefore, the development of models of the carbon-nitrogen cycle to study the contribution of tundra ecosystems is a special challenge. In this work, the modeling of carbon and nitrogen dynamics in tundra ecosystems of northern regions of Western Siberia were carried out using the reservoir-flow model including vegetation, organic carbon compounds, dissolved organic and inorganic nitrogen. Input data of the atmospheric forcing were set according to the results of calculations with CLIMBER-2 model for the last 10 thousand years. Model estimates show a regional increase in mean annual air temperature and a decrease in the annual range over a period of 10–5.5 thousand years ago due to an increase in winter temperatures in this region. According to the results of calculations, carbon stocks in soil increase monotonically during the period under consideration. Calculated soil C values for modern climatic conditions are 14700 gC/m². The reserves of nitrate and ammonium forms of nitrogen are stabilized at the beginning of the calculation period. The results of calculations show that tundra ecosystems within the last 10 thousand years, including those under conditions of near-surface warming with increasing winter temperature and minor changes in summer temperature could accumulate organic matter, absorbing carbon-containing greenhouse gases from the atmosphere.

Keywords: tundra ecosystems, dynamic models, carbon and nitrogen cycles

References

1. Eliseev A.V., Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Mokhov I.I. Changes in climatic characteristics of Northern Hemisphere extratropical land in the 21st century: assessments with the IAP RAS climate model // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. Vol. 45. pp. 271–283.
2. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Impact of climate changes over the extratropical land on permafrost dynamics under rcp scenarios in the 21st Century as simulated by the iap ras climate model // *Russian meteorology and hydrology*. 2013. Vol. 7. Pp. 31–42.
3. Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Modelling of subsidence of perennally frozen soil due to thaw for the Northern Hemisphere during the 21st century// *Kriosfera Zemli*. 2010. Vol. XIV. No. 3. Pp. 37–42.
4. Plaza C., Pegoraro E., Bracho R. et al. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra // *Nat. Geosci*. 2019. Vol. 12. Pp. 627–631.
5. Jobbagy E.N., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecol. Appl*. 2000. Vol. 10. No 2. Pp. 423–436.
6. Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Model assessments of organic carbon amounts released from long-term permafrost under scenarios of global warming in the 21st century // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 455. Part 1. pp. 346–349.
7. Schuur E., McGuire A., Schadel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520. Pp. 171–179.
8. Kleinen T., Brovkin V. Pathway-dependent fate of permafrost region carbon // *Environ. Res. Lett*. 2018. Vol. 13. No. 094001. Pp. 1–8.
9. Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Temperature Trends in the Permafrost of the Northern Hemisphere: Comparison of Model Calculations with Observations // *Doklady Earth Sciences*. 2013. Vol. 449. Part 1. Pp. 319–323.
10. Stieglitz M., Giblin A., Hobbie J., Williams M., Kling G. Simulating the effects of climate change and climate variability on carbon dynamics in Arctic tundra // *Global biogeochemical cycles*. 2000. Vol. 14, No. 4, pp. 1123–1136.
11. Maslov M.N., Makarov M.I. Organic matter of the soil of the mountain tundra in north fennoscandia // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2013. Vol. 68. No. 3. Pp. 99–103.
12. Houweling S., Kaminski T., Dentener F. et al. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model // *J. Geophys. Res*. 1999. Vol. 104. No. D21. Pp. 26137–26160.
13. Golubyatnikov L.L., Mokhov I.I., Eliseev A.V. Nitrogen Cycle in the Earth Climatic System and Its Modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys*. 2013. Vol. 49. Pp. 229–243.
14. Arora V.K., Scinocca J.F., Boer G.J. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases // *Geophys. Res. Lett*. 2011. Vol. 38. No. 5. Pp. 1–6.
15. Zavalishin N.N. Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems // *Ecological Modelling*. 2008. Vol. 213. Pp. 16–32.

16. Stieglitz M., McKane R.B., Klausmeier C.A. A simple model for analyzing climatic effects on terrestrial carbon and nitrogen dynamics: An arctic case study // *Global biogeochemical cycles*. 2006. Vol. 20. Pp. 1–11.
17. Waelbroeck C., Louis J.-F. Sensitivity analysis of a model of CO₂ exchange in tundra ecosystems by the adjoint method // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 10. No. D2. Pp. 2801–2816.
18. Bazilevich N.I., Gilmanov T.G. *Biological Productivity of Northern Eurasian Ecosystems*, Moscow: Nauka, 1993. 293 p.
19. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G. Carbon balance in tundra under contemporary climate: Significance of belowground net carbon flux. *Dokl Biol Sci.* 2014. Vol. 458. Pp. 286–288.
20. Qin S., Chen L., Fang K., Zhang Q., Wang J., Liu F., Yu J., Yang Y. Temperature sensitivity of SOM decomposition governed by aggregate protection and microbial communities // *Sci. Adv.* 2019. Vol. 5. No. 1218. P. 1–9.
21. Palmer C.A., Markstein K.P., Tanner L.H. Experimental test of temperature and moisture controls on the rate of microbial decomposition of soil organic matter: preliminary results // *Aims Geosciences*. 2019. Vol. 5. No. 4. Pp. 886–898.
22. Ganopolski A., Calov R., Claussen M. Simulation of the last glacial cycle with a coupled climate ice-sheet model of intermediate complexity // *Clim. Past*. 2010. Vol. 6. Pp. 229–244.
23. Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T. The influence of climate on peatland extent in Western Siberia since the Last Glacial Maximum // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. No. 24784. Pp. 1–6.