

Научная статья

Original article

УДК 631.4

doi: 10.55186/2413046X_2022_7_7_418

**ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ
УГЛЕРОДА И АЗОТА В ПОЧВЕННОЙ СРЕДЕ ТОРФЯНИКОВ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

**THE EFFECT OF GLOBAL WARMING ON THE ACCUMULATION OF
CARBON AND NITROGEN IN THE SOIL ENVIRONMENT OF
PEATLANDS OF THE CRYOLITHOZONE**



Гаврильева Надежда Константиновна, к.с.-х.н., доцент кафедры землеустройства и ландшафтной архитектуры, ФГБОУ ВО Арктический государственный агротехнологический университет, E-mail: nadezheda@inbox.ru

Gavrilieva Nadezhda Konstantinovna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Land Management and Landscape Architecture, Arctic State Agrotechnological University, E-mail: nadezheda@inbox.ru

Старостина Айгалина Анисимовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры землеустройства и ландшафтной архитектуры, ФГБОУ ВО Арктический государственный агротехнологический университет, Linastar2005@mail.ru

Starostina Aitalina Anisimovna, Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Land Management and Landscape Architecture, Arctic State Agrotechnological University, Linastar2005@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние глобального потепления на накопление углерода и азота в почвенной среде торфяников криолитозоны. Автор отмечает, что в условиях глобального потепления деградация вечной мерзлоты изменяет почвенную среду в торфяниках криолитозоны, увеличивая накопление углерода и азота в почве. При этом, скорость накопления органического углерода в почве выше, а реакция быстрее, что необходимо учитывать при оценке влияния данных процессов на климатические характеристики территории.

Abstract. The article examines the effect of global warming on the accumulation of carbon and nitrogen in the soil environment of peatlands of the cryolithozone. The author notes that under conditions of global warming, the degradation of permafrost changes the soil environment in the peatlands of the cryolithozone, increasing the accumulation of carbon and nitrogen in the soil. At the same time, the rate of accumulation of organic carbon in the soil is higher, and the reaction is faster, which must be taken into account when assessing the impact of these processes on the climatic characteristics of the territory.

Ключевые слова: глобальное потепление, почвенная среда, торфяники, криолитозона, накопление углерода и азота

Keywords: global warming, soil environment, peatlands, cryolithozone, carbon and nitrogen accumulation

Изменение климата является одной из самых серьезных угроз для глобального углеродного цикла. За последние три десятилетия изменение климата, вызванное деградацией вечной мерзлоты, сильно повлияло на органический углерод почвы и компоненты органического углерода. Однако обычно исследованию почвенного азота не уделяется должного внимания. Более высокая доступность почвенного азота не только увеличивает накопление органического углерода, но и снижает скорость разложения органического углерода[2]. Изменение характера распределения углерода и азота в почве при глобальном потеплении имеет решающее

значение для исследований деградации криолитозоны и изменения климата. Изучение указанных процессов в клиолитозонах необходимо для лучшего сохранения почвенного углерода и азота в торфяниках [4].

Вечная мерзлота, занимающая значительную часть суши и покрывающая большое количество почвенного органического углерода и азота, является жизненно важным запасом почвенного углерода. Наиболее чувствительны к изменению климата северные высокоширотные районы вечной мерзлоты, в которых хранится 1/3 мирового органического углерода. Выбросы CO_2 в результате глобального потепления вызвали изменения сухости и влажности торфа до 80 ± 20 Пг, а к концу XXI века это значение достигнет 249 ± 38 Пг [12].

CO_2 и CH_4 являются важными парниковыми газами, среди которых выбросы CH_4 составляют приблизительно 3% от общего количества. Исследования показали, что температура и влажность воздуха сильно влияют на минерализацию почвенного азота. При подходящих условиях воды более высокая температура будет поддерживать микробное дыхание и улучшать минерализацию почвенного азота.

Торфяники являются важным резервуаром углерода для наземных экосистем и оказывают регулирующее воздействие на глобальное изменение климата. Продолжающееся повышение температуры меняет характер промерзания и оттаивания мерзлых почв и торфяников в холодных регионах. В результате из торфяников выделяется большое количество парниковых газов, что может изменить функции источников и поглотителей углерода в торфяниках и существенно повлиять на биогеохимический цикл углерода и азота.. Более того, биохимические реакции почвы, взаимодействие между почвенными бактериями и грибами и микробная физиологическая емкость тесно связаны с доступными питательными веществами [8].

Наиболее распространенными бактериями являются гетеротрофные денитрифицирующие бактерии. Условия денитрификации включают низкое

содержание кислорода, высокую концентрацию нитратов и доступность углерода. Снижение доступности почвы будет препятствовать денитрификации. Поскольку денитрифицирующим бактериям для завершения оптимальной денитрификации требуются различные соотношения углерода и азота, изменения в доступности азота будут напрямую влиять на численность и состав микробных сообществ почвы. Поэтому баланс углерода и азота очень важен для питания почвы и микробной активности в торфяниках. Однако необходимы дополнительные исследования, чтобы полностью понять изменения содержания углерода и азота в почве в районах вечной мерзлоты [10].

Накопление углерода в почве на торфяниках служит важным индикатором изменения климата. Высокоширотная вечная мерзлота и заболоченные торфяники концентрируются в холодных регионах планеты. Скорость разложения почвенного органического углерода (SOC) увеличивается с температурой, что приводит к значительной потере углерода, хранящегося в почве. Таким образом, глобальное потепление и деградация вечной мерзлоты сильно влияют на углеродный пул болотной экосистемы и углеродный цикл.

Торфяники содержат одну треть глобального запаса углерода в почве, что равно 75% глобального запаса углерода в атмосфере. Эти почвы очень чувствительны к повышению температуры [3]. Глобальное потепление ускоряет таяние вечной мерзлоты. В районах вечной мерзлоты потепление изменяет чрезвычайно низкую температуру торфяных почв, что приводит к разложению органического вещества и выделению углерода CO_2 и CH_4 . В свою очередь, массовый выброс парниковых газов также ускоряет глобальное потепление, и таким образом формируется порочный круг.

Азот является наиболее важным лимитирующим питательным веществом в торфяной почве. Его содержание серьезно повлияет на продуктивность и хранение углерода экосистем водно-болотных угодий. Доступность азота увеличивается с температурой почвы. Когда

температура становится выше, чистая первичная продуктивность экосистемы, ограничивающей азот, и накопление углерода в экосистеме также улучшаются. Аммиачный азот и нитратный азот играют важную роль в круговороте азота.

Одна группа специалистов исследовала влияние повышения температуры на азот почвы, они продемонстрировали, что более высокая температура увеличит чистую минерализацию азота в почве и возможность потери азота почвой [11]. Другие исследователи продемонстрировали, что глобальное потепление значительно повлияло на размер пула почвенного азота и трансформацию микробного азота [7]. Экспериментальные результаты еще одной группы специалистов показали, что повышенная температура снижает способность почвы к микробной фиксации азота и поглощению азота почвой, увеличивает гибель тонких корней растений и увеличивает запасы азота [13].

Как уже было указано, глобальное потепление приводит к повышению температуры, деградации вечной мерзлоты и альтернативному замерзанию и оттаиванию активных слоев. Тип вечной мерзлоты и глубина деятельного слоя будут влиять на содержание углерода и азота в пуле почвенного углерода. Связанные исследования круговорота углерода в почве в активном слое вечной мерзлоты предоставили полезную информацию, но лишь немногие исследования сосредоточены на различии распределения углерода и азота в деятельном слое торфяников в разных районах вечной мерзлоты.

Проведенные специалистами исследования показывают, что деградация вечной мерзлоты увеличивает содержание углерода и азота в почве на торфяниках криолитозоны [9]. Глобальное потепление и деградация вечной мерзлоты серьезно повлияли на накопление почвенного углерода и азота в торфяниках. По мере повышения температуры вечная мерзлота разрушается, и деятельный слой попеременно замерзает и оттаивает. Следовательно, в поверхностном слое накапливается больше почвенного органического углерода, чем в других слоях почвы, за счет типа,

количества и разложения вышележащей растительности, которая уменьшается по вертикали.

Было высказано мнение о том, что на круговорот азота в почве сильно влияет нитрификация и денитрификация из-за повышения температуры, таяния вечной мерзлоты и круговорота азота в почве [6]. Однако другая группа специалистов, обнаружив аналогичную картину изменения общего почвенного азота и органического углерода в торфяниках криолитозоны, определила, что почвенный углерод накапливается значительно быстрее, чем почвенный азот. Это связано с тем, что вода заполняет холодный и влажный торфяник по мере таяния вечной мерзлоты [10]. Скорость производства органического углерода выше, чем скорость его разложения, что приводит к высокой скорости накопления. Относительно низкая скорость азотной реакции может быть связана с тем, что $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ и $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ являются наиболее легко поглощаемыми и утилизируемыми формами азота в почве, а вертикальная диффузия серьезно влияет на потери азота торфяников.

Растворенный органический углерод и углерод микробной биомассы являются важными компонентами активного органического углерода почвы, основные компоненты которого происходят из растительного опада, корней и их экссудатов, органического вещества почвы и почвенные микроорганизмы. Если предположить, что в ближайшие 40–50 лет это будет повышение температуры на 1–1,5 °С, южная граница вечной мерзлоты сдвинется дальше на север, а площадь вечной мерзлоты может уменьшиться еще на 35 %. Повышение температуры добавит больше органического вещества и повысит микробную активность, тем самым увеличивая скорость накопления.

По мере увеличения глубины почвы подземная биомасса резко уменьшается и активность редуцентов ослабевает. Это замедлит разложение растительных остатков в более глубоких слоях почвы. При более низкой скорости разложения органического вещества и поступления органических питательных веществ в почву обогащение азотом относительно

невелико. Тем не менее, многолетние анаэробные торфяники подвержены окислительно-восстановительному потенциалу почвы с рядом активных денитрифицирующих бактерий. В результате ускоряется окисление аммиачного азота и из почвы теряется большое количество нитратного азота.

Однако более высокое осаждение азота значительно повысит количество активного азота, что приведет к избытку азота в почве. Следовательно, нарушается круговорот азота в почве. Поскольку микроорганизмы азотного цикла по-разному реагируют на изменения окружающей среды, отношения сцепления и баланс азотного цикла нарушаются [7].

Исследования показали, что повышение температуры почвы может ускорить оборот и метаболизм микроорганизмов торфяников. С одной стороны, более высокая микробная активность на поверхности почвы и большая минерализация могут увеличить разложение органического вещества и повлиять на накопление органического углерода. С другой стороны, увядшая растительность, накопленная в поверхностном слое, может постоянно накапливать питательные вещества, а многочисленные корни обеспечивают обильный углерод для поверхностного слоя. По мере поглощения почвенным коллоидом нитратного азота почвы (NO_3^- -Н) сложный, почва относительно устойчивая, подвержена эрозии, а содержание азота в почве под поверхностным и остальными слоями не имеет существенной разницы по типам мерзлых торфяных почв. Эти условия могут замедлить скорость и степень накопления почвенного азота [10].

Многочисленные исследования показали, что направление обратной связи между микроорганизмами и климатом варьируется в зависимости от региона и масштабов изменения климата. Торфяники представляют собой очень чувствительный к климату резервуар углерода, играющий важную роль в глобальном углеродном цикле и изменении климата, и обладающий потенциалом для ограничения выбросов углерода. Однако, как только накопление углерода и азота превышает определенный предел,

трансформация органического вещества оказывается затрудненной, а структура почвы значительно повреждена, что приводит к неизмеримым потерям. Кроме того, микроорганизмы в почве являются важным фактором, регулирующим круговорот углерода и азота. Они участвуют и непосредственно влияют на биогеохимический цикл через метаболизм веществ. Согласно результатам экспериментов, микроорганизмы оказывают существенное влияние на разложение органического углерода. Основываясь на многолетнем полевом мониторинге, специалисты обнаружили, что органический углерод оказывает большое влияние на дыхание микроорганизмов [5].

По сравнению с высокотемпературной вечной мерзлотой, низкотемпературная вечная мерзлота в северной области вечной мерзлоты имеет гораздо меньше видов и почвенных микроорганизмов, и воздействие на разложение органического углерода в почве также показывает разницу. Деградация вечной мерзлоты сильно влияет на экосистему в криолитозоне высоких широт. Например, оттаивание вечной мерзлоты и повышение влажности торфяников увеличивают размножение почвенных микроорганизмов, способствуют превращению аммонийного азота в нитратный азот, уменьшают накопление аммонийного азота в почве.

Специалисты продемонстрировали, что более доступный азот повысит микробную активность почвы и ускорит разложение органического вещества, тем самым ускоряя накопление органического углерода. Поскольку накопление органического углерода увеличивается с доступностью азота, накопление углерода будет снова способствовать. Микроорганизмы, углерод и азот в почве взаимодействуют друг с другом. Некоторые бактерии постепенно исчезают из большой сплошной области вечной мерзлоты в торфяную почву в области вечной мерзлоты в форме острова, и снижение микробной активности может объяснить, почему увеличивается содержание органического углерода в почве [12].

Другие авторы указали, что почвы с высоким содержанием органического углерода более богаты микробами, а подходящее значение рН почвы повышает метаболизм и размножение микроорганизмов. Уникальная приспособляемость почвенных микроорганизмов к окружающей среде играет важную роль в круговороте углерода в почве на торфяниках районов вечной мерзлоты. Подкисление почвы изменяет биологическую активность и влияет на дыхание почвы, что, в свою очередь, влияет на накопление органического углерода в почве. Соответственно, оттаивание вечной мерзлоты, углубление деятельного слоя, снижение кислотности и изменение активности бактерий влияют на концентрацию органического углерода в крупных сплошных районах вечной мерзлоты, островных районах талой вечной мерзлоты и торфе в островных районах вечной мерзлоты [10].

Таким образом, в условиях глобального потепления деградация вечной мерзлоты изменяет почвенную среду в торфяниках криолитозоны, увеличивая накопление углерода и азота в почве. При этом, скорость накопления органического углерода в почве выше, а реакция быстрее, что необходимо учитывать при оценке влияния данных процессов на климатические характеристики территории.

Список источников

1. Волкова Н.В., Облогов Г.Е., Задорожная Н.А., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. Метан в покровном слое ландшафтов типичной тундры Марре-Сале (Западный Ямал) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. №8.
2. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. №4.
3. Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н., Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2012. №3 (19).
4. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и

5. Chen, H., Zhu, Q., Ping, C., Wu, N., Wang, Y., Fang, X., et al. (2013). The impact of climate change and human activity on biogeochemical cycles in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Globe. Change the biol.* 19 (10), 2940–2955
6. Chen, SY, Zhao, Q., Liu, WJ, Zhang, Z., Li, S., Li, HL, et al. ((2018). The effect of freezing-thawing cycles on the concentration and flow of N₂O in the soil in the permafrost areas of the Qinghai-Tibetan Plateau. *sci. Cold Arid Regions (English version)* 10 (1), 69-79.
7. Durand, J., Morse, J.L., Hoffman, P.M., Campbell, J.L., Christensen, L.M., Driscoll, K.T., et al. (2014). Winter climate change affects the microbial biomass of the soil during the growing season and activity in northern deciduous forests. *Globe. Change the biol.* 20 (11), 3568–3577.
8. Gorham, E. (1991). Northern peatlands: their role in the carbon cycle and possible reactions to climate warming. *Ecol. application* 1 (2), 182-195
9. Mu, C., Zhang, T., Wu, Q., Cao, B., Zhang, X., Peng, X., et al. ((2015). Carbon and nitrogen properties of permafrost over Mount Ebeling in the upper reaches of the Heihe River Basin, Northwest China. *Ark. Antarctica. Alp. Res.* 47 (2), 203-211.
10. Oliva, M., Pereira, P., and Antoniades, D. (2018). Ecological consequences of permafrost degradation in a changing climate. *sci. General environment.* 616-617, 435-437
11. Shibata, H. (2016). The impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: Synthesis of Japanese case studies. *Ecol. indic.* 65, 4–9
12. Song, CC, Song, Y Y, Wang, XW, Guo, YD, Sun, L., and Zhang, XH (2018). Progress in research on carbon and nitrogen cycles in the wetlands ecosystem under climate change. *Wet. scientific.* 16 (3), 424–431.
13. Zimov, S.A., Shur, EAG, and Chapin, F.S. (2006). Permafrost and the global carbon balance. *Science* 312 (5780), 1612-1613

14. Baumann F., Jin-Sheng H.E., Schmidt K., Kuhn P. and Scholten T. (2009). Pedogenesis, permafrost and soil moisture as factors controlling the nitrogen and carbon content in the soil on the Tibetan Plateau. *Global changes of biol.* 15 (12), 3001–3017

References

1. Volkova N.V., Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A., Streletskaya I.D., Vasiliev A.A. Methane in the cover layer of landscapes of the typical tundra of the Mare-Sale (Western Yamal) // Relief and quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia. 2021. №8.
2. Konishchev V. N. Permafrost response to climate warming // Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography. 2009. №4.
3. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Microbiological factors controlling the carbon cycle in thermokarst water bodies of Western Siberia // Vestn. Volume. State University. Biology. 2012. №3 (19).
4. Shpolyanskaya N.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. Modern climate change and cryolithozone reaction (on the example of Western Siberia and the European North of Russia) // Geographical environment and living systems. 2022. №1.
5. Chen H., Zhu K., Ping K., Wu N., Wang Yu., Fang H. et al. (2013). The impact of climate change and human activity on biogeochemical cycles in the Qinghai-Tibetan Plateau. *The globe. Change the biol.* 19 (10), 2940–2955
6. Chen, Xi, Zhao, Q., Liu, WJ, Zhang, Z., Li, S., Li, HL, etc. ((2018). The effect of freeze-thaw cycles on the concentration and flow of N₂O in the soil in the permafrost areas of the Qinghai-Tibetan Plateau. *the science. Cold Arid Regions (English version)* 10 (1), 69-79.
7. Durand, J., Morse, J. L., Hoffman, P.M., Campbell, J. L., Christensen, L.M., Driscoll, K.T. and others (2014). Winter climate change affects soil microbial biomass during the growing season and activity in northern deciduous forests. *The globe. Change the biol.* 20 (11), 3568-3577.
8. Gorham, E. (1991). Northern peatlands: their role in the carbon cycle and possible reactions to climate warming. *Ecol. appendix* 1 (2), 182-195

9. Mu, C., Zhang, T., Wu, Q., Cao, B., Zhang, X., Peng, X. et al. ((2015). Carbon and nitrogen properties of permafrost over Mount Ebeling in the upper reaches of the Heihe River basin in northwestern China. *The Ark. Antarctica. Alp. Res.* 47 (2), 203-211.
10. Oliva M., Pereira P. and Antoniades D. (2018). Ecological consequences of permafrost degradation in a changing climate. *General environment.* 616-617, 435-437
11. Shibata, H. (2016). The impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: a synthesis of Japanese case studies. *Ecol. Article* 65, 4-9
12. Song, CC, Song, Y Y, Wang, XW, Guo, YD, Song, L. and Zhang, XH (2018). Progress in research on the carbon and nitrogen cycle in the wetland ecosystem under climate change. *Wet. scientific.* 16 (3), 424-431.
13. Zimov S.A., Shur, EAG and Chapin F.S. (2006). Permafrost and the global carbon balance. *Science* 312 (5780), 1612-1613
14. Baumann F., Jin-Sheng H.E., Schmidt K., Kuhn P. and Scholten T. (2009). Soil genesis, permafrost and soil moisture as factors controlling the nitrogen and carbon content in the soil in the Tibetan Plateau. *Global changes of biol.* 15 (12), 3001–3017

Для цитирования: Гаврильева Н.К., Старостина А.А., Влияние глобального потепления на накопление углерода и азота в почвенной среде торфяников криолитозоны // Московский экономический журнал. 2022 № 7. URL: <https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-7-2022-28/>

© Гаврильева Н.К., Старостина А.А., 2022 Московский экономический журнал, 2022, № 7.