

УДК 551.345.2:631.417

ДЕГРАДАЦИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Санников О.А.,

студент кафедры лесного хозяйства и ландшафтного строительства ТГУ

e-mail: Sannikov.oa.2025@yandex.ru

Аннотация. В статье обобщены современные представления о трансформации органического углерода при деградации многолетнемерзлых пород Восточной Сибири. Рассмотрены постепенное углубление сезонноталого слоя, термокарст, перенос растворенного органического вещества во внутренние воды и микробная минерализация. Показано, что климатический эффект определяется не только количеством оттаявшего углерода, но и влажностным режимом: аэробные условия усиливают выброс CO₂, тогда как переувлажнение повышает роль CH₄. Отдельно рассмотрена способность минеральной матрицы стабилизировать часть органического вещества.

Ключевые слова: *многолетняя мерзлота, Восточная Сибирь, почвенный углерод, термокарст, углекислый газ, метан, активный слой.*

PERMAFROST DEGRADATION AND SOIL CARBON TRANSFORMATION IN EASTERN SIBERIA

Sannikov O.A.,

student of the Department of Forestry and Landscape Construction, TSU

e-mail: Sannikov.oa.2025@yandex.ru

Abstract. The paper reviews current understanding of organic carbon transformation during permafrost degradation in Eastern Siberia. Gradual active-layer deepening, thermokarst, dissolved organic carbon transfer to inland waters and microbial mineralization are considered. The climate effect depends not only on the amount of thawed carbon but also on soil moisture: aerobic conditions favour CO₂ release, whereas waterlogging increases the role of CH₄. Mineral protection of part of the organic matter is also discussed.

Keywords: *permafrost, Eastern Siberia, soil carbon, thermokarst, carbon dioxide, methane, active layer.*

Введение

Многолетнемерзлые породы Восточной Сибири содержат крупные запасы органического вещества, накопленного в течение тысяч и десятков тысяч лет. Пока грунт остается мерзлым, значительная часть этого углерода недоступна для микробного разложения. Повышение температуры и увеличение мощности сезонноталого слоя переводят ранее законсервированное органическое вещество в биогеохимически активное состояние.

Наиболее важное различие проходит между постепенным оттаиванием сверху и быстрым термокарстовым разрушением льдистых грунтов. Во втором случае просадка поверхности, образование озер и изменение дренажа способны вовлекать в современный круговорот глубокие плейстоценовые горизонты, которые обычные модели активного слоя учитывают неполно [2,6].

Цель статьи – систематизировать механизмы высвобождения, переноса и стабилизации почвенного углерода при деградации мерзлоты Восточной Сибири. Работа является обзорно-аналитической и основана на опубликованных полевых, лабораторных и модельных исследованиях.

Методы и методики

Материал отбирался по трем группам исследований: модельные оценки глубины оттаивания и термокарста; лабораторные инкубации мерзлотных почв; полевые измерения форм углерода в реках, озерах и термокарстовых водоемах. Такой подход позволяет

проследить цепочку от физического оттаивания грунта до микробной минерализации и гидрологического экспорта.

В качестве основных показателей использовались мощность сезонноталого слоя, запас органического углерода, концентрация растворенного органического углерода, поток CO_2 и CH_4 , а также радиоуглеродный возраст органического вещества. Радиоуглеродные данные особенно важны для отделения современного углерода растительного происхождения от древнего углерода мерзлоты.

Температурная чувствительность микробного разложения описывалась коэффициентом Q_{10} , показывающим, во сколько раз изменяется скорость процесса при повышении температуры на 10°C . По метаанализу инкубационных экспериментов повышение температуры на 10°C примерно удваивало суммарное высвобождение углерода из мерзлотных почв [3].

Результаты

Моделирование льдистых низменностей северо-восточной Сибири показывает, что учет термокарстовых процессов резко повышает оценку количества органического углерода, переходящего в талое состояние при сильном потеплении. В сценариях интенсивного потепления во второй половине XXI века эффект таяния избыточного льда и просадки рельефа становится сопоставимым или больше эффекта одного только постепенного углубления активного слоя [2].

Физическое оттаивание не означает немедленного поступления всего углерода в атмосферу. Часть вещества остается сорбированной на минеральной поверхности, часть переносится водой, часть включается в современную пищевую сеть. Исследования плейстоценовой мерзлоты показывают, что минерально-ассоциированная фракция способна быть существенно устойчивее свободного органического вещества [7].

После оттаивания судьба углерода определяется влажностью. Метаанализ лабораторных экспериментов показал, что при аэробной инкубации мерзлотные почвы высвобождали существенно больше углерода, чем при анаэробной [3]. При этом в переувлажненных условиях возрастает доля метана, обладающего более высоким потенциалом потепления на единицу массы.

Поэтому осушение и обводнение термокарстовых форм дают различные климатические траектории. Хорошо дренированная просадочная поверхность благоприятствует аэробному дыханию и CO_2 , тогда как озерные и болотные микросреды увеличивают вероятность метаногенеза.

В верховьях бассейна Колымы обнаружен растворенный органический углерод древнего радиоуглеродного возраста, который может активно использоваться микробными сообществами [4]. Однако в более крупных водотоках и многих внутренних водоемах значительная часть эмитируемого углерода имеет современное происхождение [5]. Это показывает, что усиление термокарста меняет углеродный цикл не только через прямое высвобождение древнего вещества, но и через перестройку современной продуктивности и водной биогеохимии.

Следовательно, оценка мерзлотно-углеродной обратной связи должна включать физическую скорость оттаивания, гидрологический режим и биодоступность органического вещества. Один только запас углерода в мерзлоте не позволяет напрямую оценить будущие выбросы.

Обсуждение

Деградация многолетней мерзлоты Восточной Сибири представляет собой совокупность физических, гидрологических и биогеохимических процессов, определяющих дальнейшую судьбу почвенного углерода. Исследования Nitzbon et al. [2] и Turetsky et al. [6] показывают, что термокарст способен ускорять высвобождение органического вещества по сравнению с постепенным углублением сезонноталого слоя. Однако оттаивание не приводит к немедленной минерализации всего содержащегося в грунте углерода, поскольку часть вещества сохраняется благодаря взаимодействию с минеральной матрицей [7]. Существенным

фактором трансформации углерода является влажность: аэробные условия способствуют образованию CO_2 , тогда как переувлажнение повышает роль метаногенеза [3]. При этом термокарстовые озера и речные системы выступают не только источниками парниковых газов, но и каналами переноса растворенного органического вещества. Исследования Mann et al. [4] и Campeau et al. [5] демонстрируют, что возраст и происхождение углерода, поступающего во внутренние воды, могут существенно различаться. Это подтверждает необходимость применения радиоуглеродного анализа для определения вклада древнего мерзлотного углерода в современные биогеохимические процессы. Ограничения лабораторных экспериментов и моделей обуславливают необходимость их сопоставления с долговременными полевыми наблюдениями. Следовательно, достоверная оценка климатических последствий деградации мерзлоты требует комплексного учета скорости оттаивания, водного режима, минеральной стабилизации и потоков CO_2 и CH_4 .

Заключение

Деградация многолетней мерзлоты Восточной Сибири переводит древний органический углерод из мерзлого резервуара в активный биогеохимический цикл, но дальнейшая судьба этого углерода неоднозначна. Термокарст ускоряет вовлечение глубоких горизонтов, тогда как минеральная стабилизация и гидрологический экспорт способны задерживать часть вещества.

Ключевым регулятором газового отклика является увлажнение: аэробные условия усиливают CO_2 -выделение, а анаэробные – повышают относительную роль CH_4 . Поэтому надежный прогноз требует сопряжения мерзлотных, гидрологических и биогеохимических наблюдений, включая радиоуглеродный анализ.

Литература

1. Roshydromet. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/39990/> (дата обращения: 07.10.2026).
2. Nitzbon J. et al. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate // Nature Communications. 2020. Vol. 11. PP. 22-25.
3. Knoblauch C. et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. PP. 950-953.
4. Mann P.J. et al. Utilization of ancient permafrost carbon in headwaters of Arctic fluvial networks // Nature Communications. 2015. Vol. 6. PP. 78-56.
5. Campeau A. et al. East Siberian Arctic inland waters emit mostly contemporary carbon // Nature Communications. 2020. Vol. 11. PP. 16-27.
6. Turetsky M.R. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release // Nature. 2019. Vol. 569. P. 32-34.
7. Jongejans L.L. et al. Stabilization of mineral-associated organic carbon in Pleistocene permafrost // Nature Communications. 2023. Vol. 14. PP. 21-20.
8. Wild B. et al. Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming // Nature Communications. 2016. Vol. 7.