

УДК 631.21

**ИЗУЧЕНИЕ ФОТОХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ  
РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И  
ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ  
СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**Т. В. Раудина<sup>1)</sup>, Г. И. Истигечев<sup>1)</sup>, С. В. Смирнов<sup>1, 2)</sup>**

<sup>1)</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
пр. Ленина 36, 634050, г. Томск, Россия, [tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)*

<sup>2)</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
пр. Академический 10/3, 634055, г. Томск, Россия*

Экспериментально изучен процесс фотодеструкции растворенного органического вещества (РОВ), а также поведение металлов во время его фотолиза в водах от торфяных почв плоскобугристого болота через небольшие водотоки к пойме малой реки в условиях юга криолитозоны Западной Сибири. Установлено, что в ходе эксперимента по фотодеструкции к 28 дню в водах наблюдается заметное снижение концентрации растворенного углерода (РОУ) и, соответственно, увеличение фоторазлагаемого РОУ (ФРОУ) до 14%. Процент ФРОУ имеет прямую линейную зависимость от времени инкубации, и его наибольший процент по сравнению с ручьем отмечается в почвенно-болотной воде бугра и мочажины. Выявлено три закономерности в поведении металлов во время фотолиза РОВ. Результаты подчеркивают необходимость учета процента ФРОУ для количественной оценки циклов углерода в мерзлых торфяниках

**Ключевые слова:** Западная Сибирь; северная тайга; растворенное органическое вещество; фотодegradация.

**STUDY OF PHOTOCHEMICAL TRANSFORMATION  
OF DISSOLVED ORGANIC MATTER AND BEHAVIOR OF METALS  
IN NATURAL WATERS OF THE NORTHERN TAIGA  
OF WESTERN SIBERIA**

**T. V. Raudina<sup>1)</sup>, G. I. Istigechev<sup>1)</sup>, S. V. Smirnov<sup>1, 2)</sup>**

<sup>1)</sup>*National Research Tomsk State University, Lenin Ave. 36, 634050, Tomsk, Russia,  
[tanya\\_raud@mail.ru](mailto:tanya_raud@mail.ru)* <sup>2)</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,  
Academicheskyy ave., 10/3, 634055, Tomsk, Russia*

The process of photodegradation of dissolved organic matter (DOM) as well as the behavior of metals during its photolysis in waters from peat soils of a flat-mound bog through small watercourses to the floodplain of a small river in the northern taiga of Western Siberia has been studied experimentally. It was found that during the photodegradation experiment, by day 28, there is a marked decrease in dissolved carbon concentration (DOC) in the waters

and, accordingly, an increase in photodegradable DOC (PDOC) up to 14 %. Percent PDOC has a direct linear relationship with incubation time and its highest percentage compared to the stream is observed in the soil-bog waters of the mound and hollow. Three patterns of metal behavior during photolysis of DOM were identified. The results emphasize the need to consider percent PDOC to quantify carbon cycling in frozen peatlands.

**Key words:** Western Siberia; northern taiga; dissolved organic matter; photodegradation.

Воды бореальных и циркумполярных регионов отличаются высоким содержанием растворенного органического вещества (РОВ), количество и состав которого изменяется в пространстве и во времени не только из-за его близости к исходному материалу, но и воздействия окружающей среды. Трансформация РОВ во время его миграции является важным процессом, который обеспечивает существование биологических циклов элементов в природе и стабильности водных экосистем. Поэтому динамика РОВ имеет решающее значение для локального и глобального циклов углерода. Солнечное излучение оказывает различное влияние на состав и свойства РОВ, его переработку бактериями. Отмечается как значительное влияние фотоллиза на трансформацию РОВ, изменение биологической доступности элементов [1-5] и интенсивности эмиссии  $\text{CO}_2$  из поверхностных вод в атмосферу [6], так и довольно небольшое (10 %) воздействие солнечного света на общую концентрацию РОУ в ручьях, реках и озерах [7-10]. Совместная фотохимическая и биологическая переработка свежего РОВ при незначительном предварительном воздействии света может преобразовать до 90 % растворенного органического углерода в  $\text{CO}_2$ , в то время как переоблучение или предыдущая биodeградация РОВ может снизить его последующую доступность для бактерий и подавить преобразование в  $\text{CO}_2$  [11-12]. Предсказание судьбы арктических запасов углерода в условиях потепления может зависеть от его фотобиологической реакции и от того, будет ли РОВ, попавшее из почв в поверхностные воды, преимущественно преобразовано в  $\text{CO}_2$  и выброшено в атмосферу или перенесено вниз по течению в океан. Поскольку транспорт большинства микро- и макроэлементов в этих водах осуществляется в форме органических и органо-минеральных коллоидов, то необходимо также учитывать поведение металлов. Несмотря на то, что в зарубежной литературе имеется значительное количество экспериментальных оценок влияния процессов деструкции на свойства и содержание РОВ в почвенных и поверхностных водах, таких исследований в пределах Западной Сибири практически не ведется [13]. В связи с этим основной целью работы явилось экспериментальное изучение процессов фотодеструкции РОВ

речных и почвенных вод, а также поведения металлов во время его фотолиза в условиях юга криолитозоны Западной Сибири.

Для достижения поставленной цели на ключевом участке в северной тайге (63,78° с. ш.; 75,62 в. д., окрестности пос. Ханымей, ЯНАО) были отобраны почвенные и речные воды от торфяных почв плоскобугристого болота через небольшие водотоки к пойме малой реки. Для определения содержания фоторазлагаемого углерода (% ФРОУ) образцы воды фильтровались (0,22  $\mu\text{m}$ , Millipore) и подвергались воздействию солнечного света в герметично закрытых стерильных кварцевых пробирках под открытым солнцем в течение 28 дней. После повторной фильтрации образцов на 0, 2, 7, 14, 21 и 28 дни эксперимента определялись рН, содержание растворенного органического углерода (РОУ, VarioTOCCube), элементный состав (ICP-MS, Agilent 7500) и оптические плотности (Variscan, Cary 50 Scan. UV-Visible) для оценки качественного состава РОВ путем расчета спектрофотометрических характеристик (E254:E436, E250:365, S275-295, S350-400, SR; SUVA<sub>254</sub>).

В ходе эксперимента по фотодеструкции к 28 дню в водах наблюдается заметное снижение концентрации РОУ во фракции < 0,22 мкм ( $p < 0,05$ ,  $R^2 = 0,59-0,62$ ) и, соответственно, увеличение ФРОУ до 14 %. % ФРОУ имеет прямую линейную зависимость от времени инкубации, и его наибольший процент по сравнению с ручьем отмечается в почвенно-болотной воде бугра и мочажины (7,8 и 13,6 % к 28 дню соответственно). Снижение SUVA<sub>254</sub>, S350-400 и увеличение SR, S275-295 и их корреляция говорят о потере высокомолекулярных органических соединений, что связано с их разрушением до низкомолекулярных, которые удаляются уже при повторной фильтрации. А увеличение доли низкомолекулярных соединений, в свою очередь, может повысить их биодоступность. Рассматривая поведение металлов в ходе фотолиза, можно выделить три закономерности, а именно: ряд металлов 1) уменьшается, и они часто коррелируют с РОУ и между собой (Al, Fe, Co, Cu, Mn, Mo, Ti, V, Cr, Rh, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pb), что связано с присутствием в большом количестве органо-минеральных коллоидов в данных водах и, соответственно, с их разложением; 2) не меняет свои концентрации (Ba, B, As, Sb, Cs) и 3) возрастает в ходе эксперимента (Si, Li, Ba, иногда Sr).

Таким образом, фотолиз влияет на количественный и качественный состав РОВ в изучаемых водах. Учитывая быструю фоторазлагаемость РОВ в начале гидрологического пути, предполагается, что более высокомолекулярный, ароматический наземный РОВ замещается ниже по гидрохимическому пути фотообесцвеченными молекулами меньшего размера, что, в свою очередь, увеличивает способность микроорганизмов

минерализовать РОВ. Результаты подчеркивают необходимость учета неоднородности концентраций растворенного органического углерода и трансформации РОВ для количественной оценки циклов углерода в мерзлых торфяниках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00281.

### Библиографические ссылки

1. *Porcal P., Dillon P. J., Molot L. A.* Photochemical production and decomposition of particulate organic carbon in a fresh water stream // *Aquat. Sci.* 2013. Vol. 75. P. 469–482.
2. *Porcal P., Dillon P. J., Molot L. A.* Interaction of extrinsic chemical factors affecting photodegradation of dissolved organic matter in aquatic ecosystems // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2014. Vol. 13. P. 799–812.
3. *Porcal P., Dillon P. J., Molot L. A.* Temperature dependence of photodegradation of dissolved organic matter to dissolved inorganic carbon and particulate organic carbon // *PLoS One.* 2015. Vol. 10, iss. 6. e0128884.
4. Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters / R. M. Cory [et al.] // *Science.* 2014. Vol. 345. P. 925–928.
5. Photochemical alteration of organic carbon draining permafrost soils shifts microbial metabolic pathways and stimulates respiration / C. P. Ward [et al.] // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. № 772.
6. *Cory R. M., Kling G. W.* Interactions between sunlight and microorganisms influence dissolved organic matter degradation along the aquatic continuum // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2018. Vol. 3. P. 102–116.
7. Photochemical mineralisation in a boreal brown water lake: considerable temporal variability and minor contribution to carbon dioxide production / M. Groeneweld [et al.] // *Biogeosciences.* 2006. Vol. 13. P. 3931–3943.
8. Sunlight induced carbon dioxide emissions from inland waters / B. Koehler [et al.] // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 2014. Vol. 28. P. 696–711.
9. Low biodegradability of dissolved organic matter and trace metal from subarctic waters by culturable heterotrophic bacteria / O. Oleinikova [et al.] // *Sci. Tot. Environ.* 2018. Vol. 618. P. 174–187.
10. Humic surface waters of frozen peat bogs (permafrost zone) are highly resistant to bio- and photodegradation / L. S. Shirokova [et al.] // *Biogeosciences.* 2019. Vol. 16. P. 2511–2526.
11. *Moran M. A., Sheldon W. M., Zepp R. G.* Carbon loss and optical property changes during long-term photochemical and biological degradation of estuarine dissolved organic matter // *Limnol Oceanogr.* 2000. Vol. 45. P. 1254–1264.
12. *Vähätalo A. V., Wetzel R. G.* Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months-years) exposures // *MarChem.* 2004. Vol. 89. P. 313–326.
13. Dissolved organic matter biodegradation along a hydrological continuum in a discontinuous permafrost area: Case study of northern Siberia and Sweden / D. Payandi-Rolland [et al.] // *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 749. 141463.