УДК 550.47

**ЗАПАСЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДИСПЕРСНОМ ЛЬДУ
МОЛОДЫХ ТУНДРОВЫХ БОЛОТ И РЕЛИКТОВЫХ
РАННЕГОЛОЦЕНОВЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ БОЛОТАХ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**А. Г. Лим, С. В. Лойко, И. В. Крицков, Д. М. Кузьмина,
С. П. Кулижский, О. С. Покровский**

*Томский государственный университет, пр. Ленина, 36,
634050, г. Томск, Россия, lim_artiom@mail.ru*

Изучены поровые воды деятельного слоя и торфяной лед реликтового раннеголоценового полигонального болота и молодого болота котловины осушенного термокарстового озера в южной тундре Западной Сибири. Выявлено что запасы С, Р, К, Si, Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Mo в поровой воде деятельного слоя выше на молодом болоте. В торфяном льду реликтового полигонального болота запасы тех же элементов в несколько раз выше, чем в молодом болоте. Эти результаты показывают, что запасы изученных элементов накапливались в реликтовых болотах в первой половине голоцена, а к настоящему времени в молодых болотах их накопилось заметно меньше. А поскольку замерзшие болота на юге тундры в Западной Сибири к концу века должны исчезнуть, они уже не могут накапливаться. Следовательно, наиболее существенный вклад в увеличение летних потоков химических элементов из водоразделов в реки будут вносить реликтовые, а не молодые болота.

Ключевые слова: мерзлые плоскобугристые болота; химический элементный состав; Западная Сибирь; углерод, почвы.

**STOCKS OF CHEMICAL ELEMENTS IN DISPERSED ICE OF
YOUNG TUNDRA BOGS AND RELICT EARLY HOLOCENE
POLYGONAL BOGS OF WESTERN SIBERIA**

**A. G. Lim, S. V. Loiko, I. V. Krickov, D. M. Kuzmina, S. P. Kulizhsky,
O. S. Pokrovsky**

Tomsk state university, Lenin Av., 36, 634050, Tomsk, Russia, lim_artiom@mail.ru

We have studied the pore waters of the active layer and dispersed ice of a relic Early Holocene polygonal bog and a young bog of a basin of a drained thermokarst lake in the southern tundra of Western Siberia. Peat accumulation in the polygonal relic bog began about 10,000 years ago. Stocks of C, P, K, Si, Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Mo in the pore water of the active layer are higher in the young bog. On the contrary, in the dispersed ice of the relict polygonal bog, the stocks of the same elements are several times higher than in the young bog. These results show that the stocks of the studied elements accumulated in the relict bogs in the first half of the Holocene, and by now they have accumulated noticeably

less in young bogs. And since the frozen bogs in the south of the tundra in Western Siberia should disappear by the end of the century, they can no longer accumulate. Consequently, the most important contribution to the increase in the summer fluxes of chemical elements from watersheds to rivers will be made by relict rather than young bogs.

Keywords: flat frost mound bog; composition of chemical elements; Western Siberia; carbon; soils.

Последствия таяния вечной мерзлоты являются одним из центральных вопросов экологических исследований, связанных с потеплением климата в Арктике [1]. Мало что известно о химических свойствах торфяного льда, распространенного на вечномерзлых торфяниках, который может легко таять с увеличением толщины активного слоя. Это особенно актуально для континентальных низменностей, которые составляют значительную территорию Арктики и содержат большое количество органического углерода как в твердой (торф), так и в жидкой (поровые воды) фазах [2, 3]. Нами было проведено исследование элементного состава болот — молодого и раннеголоценового с целью оценки запасов элементов и их потенциального стока и воздействия на речной сток элементов.

Место исследования расположено в южной тундре Западной Сибири в зоне непрерывного распространения многолетней мерзлоты (п. Тазовский, ЯНАО, Россия). Мы изучили состав жидкой фазы 3 кернов: 2 торфяных керна с раннего голоценового полигонального болота (полигон и мочажина) и 1 керн, отобранный молодого болота, сформировавшегося на месте дренированного озера. Отбор мерзлой части керна был с использованием металлической трубы и кувалды. Мёрзлые пробы были растоплены в термостате, и затем жидкая фаза извлекалась с использованием нейлоновой сеткой с диаметром ячеек 100 мкм. Всего отобрано 40 проб. После чего, пробы центрифугировали и над осадочную часть фильтровали, используя шприцевые фильтр-насадки с диаметром пор 0,45 мкм.

В раннеголоценовом полигональном болоте вертикальные концентрации макро- и микроэлементов увеличиваются в средней части керна на глубине 70-80 см и 110-120 см, на полигоне и мочажине, соответственно. Это увеличение концентрации отчетливо наблюдается на глубине 40-70 см ниже границы оттаивания. Для примера, концентрации растворенного органического углерода (РОУ) достигали значений 2200 и 600 мг/л. Некоторые другие элементы также демонстрировали пик аккумуляции на этой глубине. Однако, такой тип распределения элементов характерен больше для раннеголоценового болота. Распределение элементов по профилю в керне молодого болота монотонно для большинства элементов (например, РОУ, Na, K, P). В керне молодого болота наблюдается увеличение концентраций элементов не для всех элементов. Концентрации таких элементов, как Na, Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni и Sr оказались выше в мерзлой части, чем в талой.

Запасы большинства элементов в талом слое молодого болота в 2-12 раз больше, чем в талом слое полигона (Na, Mg, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Mo, Cd). Однако запасы редкоземельных элементов (РЗЭ) в 2-5 раза выше в раннеголоценовом болоте на полигоне, чем в молодом болоте. Запасы элементов в талой части мочажины как правило меньше в 2-3 раза, чем в молодом болоте (C, Na, Al, Si, P, K, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo.). Наблюдаются больше отличия запасов химических элементов в мерзлом слое раннеголоценового и молодого болота. Разница может достигать величин в 5-55 раз. Наиболее обогащен мерзлый слой раннеголоценового слоя. Запасы C, P, V, Zn, Rb, Cd, Cs в нем в 10-55 раз больше, чем в молодом болоте. Содержание остальных элементов (Al, K, Ca, Cr, Cu, Ga, As, Sr, U и РЗЭ) больше в 2-10 раз. В сравнении с мочажинной, запасы таких элементов как C, Be, B, Al, P, K, V, Zn, U в 2-5 раз выше по сравнению с молодым болотом. Колоссальные отличия запасов талого и мерзлого слоя в торфяной залежи варьирует в широком диапазоне. Для раннеголоценового болота на полигоне характерно превышение запасов в 50-100 раз в мерзлом слое относительно талого, то в молодом болоте большинство элементов имеет более слабую выраженность в запасах элементов между талым и мёрзлым слоем. Таким образом, получается, что потенциально оттаивание мерзлой части озерных отложений старого хасырея не окажет сильного влияния на латеральный экспорт элементов.

Запасы в талом слое очень сильно влияют на видовой состав наземной растительности и ее продуктивность. Несмотря на то, что запасы элементов талого корнеобитаемого слоя хасырея в разы превышают запасы на полигональном болоте, видовой состав и продуктивность мало чем отличается от болотного. Причиной тому является то, что в начале процесса трансформации осушенного озера в результате высокой продуктивности происходит интенсивное накопление мощной подстилки. Как правило эта подстилка со временем превращается в торф и тем самым доступ корней растений к озерным отложениям становится более затруднителен. Мощность торфяного слоя над озерными отложениями и интенсивность накопления подстилки являются лимитирующими факторами продуктивности и видового состава растительности хасыреев.

Оптические свойства органического вещества показали, что поровые воды талого слоя раннеголоценового болота характеризуются высокими показателями СУВА₂₅₄ (3,2-4,1). Это свидетельствует о высокой доле ароматичных компонентов в составе органических соединений. Однако в мерзлом слое раннеголоценового болота наблюдается резкое снижение СУВА₂₅₄ (до 1-1,5), что означает о наличии в составе органического вещества лабильных (низкомолекулярных) соединений [4]. В молодом болоте в том же слое этот показатель ниже в 2 раза (2,1-2,4) и по вертикальному профилю монотонно неизменный. Еще один интеграль-

ный оптический показатель - спектральный наклон S_R – свидетельствуют о том, что в составе органического вещества поровых вод талого слоя преобладают соединения с высокой молекулярной массой. Причиной может быть потеря лабильного пула низкомолекулярных соединений в следствие био- и фотодеградациии, или, как следствие микробной продукции низкомолекулярных соединений [5, 6]. По сути, это является фронтом промерзания, в котором циклично год за годом происходит заморозка и оттаивание, при котором возможно формирование низкомолекулярных органических соединений [7].

В талом слое молодого болота выявлены большие запасы по сравнению с раннеголоценовым болотом. Концентрации и запасы химических элементов в мерзлой части профиля раннеголоценового болота больше, чем в талом слое и больше, чем в молодом болоте. В раннеголоценовом болоте обнаружен пик аккумуляции элементов ниже границы талого слоя, чего не было в профиле молодого болота. Запасы элементов в мерзлой части раннеголоценового болота при оттаивании могут существенно повысить сток в речную сеть. Продуктивность и видовое разнообразие растительного покрова молодого болота намного выше, чем в реликтовом раннеголоценовом болоте.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006).

Библиографические ссылки

1. Čapek P., Diáková, K., Dickopp J. E. The effect of warming on the vulnerability of subducted organic carbon in arctic soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 90. P. 19–29.
2. Grosse G., Goetz S., McGuire A. D. Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, iss. 4. P. 040201.
3. Drake T. W., Wickland K. P., Spencer R. G. Ancient low-molecular-weight organic acids in permafrost fuel rapid carbon dioxide production upon thaw // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112, iss. 45. P. 13946-13951.
4. Ilina S. M., Drozdova O. Y., Lapitskiy S. A. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed // *Organic geochemistry*. 2014. Vol. 66. P. 14–24.
5. Payandi-Rolland D., Shirokova L. S., Tesfa M. DOC biodegradation behavior along permafrost affected hydrological continuum // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. P. 874–875.
6. Chupakova A. A., Chupakov A. V., Neverova N. V. Photodegradation of river dissolved organic matter and trace metals in the largest European Arctic estuary // *Science of the Total Environment*/ 2018. Vol. 622. P. 1343–1352.
7. Payandi-Rolland D., Shirokova L. S., Labonne F. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands // *Chemosphere*. 2021. Vol. 279. P. 130510.