

ИСКОПАЕМОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ – СОДЕРЖАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ

**Л. Ширмейстер¹, С. Веттерих¹, Г. Гроссе², Й. Штраус¹, К. Зигерт¹, П.П. Овердуин¹
& Х.-В. Хуббертен¹**

¹ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Потсдам, ФРГ

² Геофизический Институт Аласкийского Университета, Фербэнкс, США

Многолетнемерзлые отложения содержат большое количество углерода, способного разлагаться и выделяться при потеплении климата. Однако имеется мало данных о характере органического вещества в многолетнемерзлых породах, о его пространственном распределении и способности к разложению. Нами были изучены абсолютное содержание углерода (ТС) и органического углерода (ТОС), аналитический состав C/N и $\delta^{13}\text{C}$ органического материала (ОМ) в многолетнемерзлых отложениях, вскрывшихся в берегах Морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также в дельте Лены и в Индигиро-Колымской низменности.

FOSSIL ORGANIC MATTER IN PERMAFROST DEPOSITS OF NORTHERN EAST SIBERIA – CONTENTS AND CHARACTERISTICS

**L. Schirrmeister¹, S. Wetterich¹, G. Grosse², J. Strauss¹, C. Siegert¹, P.P. Overduin¹
& H.-W. Hubberten¹**

Permafrost deposits constitute a large carbon pool highly sensitive to degradation and potential carbon release due to global warming. However, only a few detailed analyses have been made on the character of this carbon pool, its spatial variability, and its availability for decomposition. Most important and highly sensitive to degradation are Ice Complex deposits. Permafrost sections at coast and river bank sections on the Laptev and East Siberian seas, in the Lena River Delta and in the Indigirka–Kolyma lowland region were studied for carbon contents (TC; TOC) and organic matter (OM) parameters (C/N, $\delta^{13}\text{C}$).

¹ Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Research Unit, Potsdam, Germany

² University of Alaska, Geophysical Institute; Fairbanks, USA

1. Введение

Значительное количество органического углерода было накоплено в четвертичных многолетнемерзлых отложениях арктических регионов. При деградации мерзлоты это вещество может разлагаться и выделяться в атмосферу и гидросферу. Чтобы оценить динамику углерода в области многолетнемерзлых пород необходимо получить данные о распределении углерода, его особенностях и способности к разложению.

По отношению к этому нами были изучены следующие вопросы:

- Как органический углерод распределяется по разрезу и по площади в многолетнемерзлых породах?
- Как были взаимосвязаны четвертичные ландшафты и динамика углерода?
- Какой биогеохимический состав имеет это органическое вещество?

Рис. 1. Местоположение разрезов с данными об органическом углероде и его площадном и вертикальном распределении

2. Район исследования

Разрезы многолетнемерзлых пород нами использовались как архив данных для реконструкции развития окружающей среды и динамики климата Арктики за

последние 200 000 лет. С этой целью за последние 12 лет многочисленные обнажения были изучены вдоль побережья Морей Лаптевых и Восточносибирского, а также по речным берегам прилегающих районов (рис. 1) [x, 1] (Зигерт и др., 2009; Schirrmeister et al., 2010).

3. Пространственное распределение поздне-четвертичных стратиграфических единиц

В соответствии с имеющимися криолитологическими, палеоэкологическими и геохронологическими данными, разрезы многолетнемерзлых пород представляют различные стратиграфические сечения по древним перигляциальным ландшафтам (Andreev et al., [2] 2004, [3] 2009; Schirrmeister et al., [4] 2002a, [5] 2002b, [6] 2003, [7] 2008, [1] 2010, [8] 2009, [9] in press; Wetterich et al., [10] 2008, [11] 2009; [12] Grosse et al., 2007). В зависимости от палеоэкологической обстановки органическое вещество накапливалось и консервировалось в мерзлоте в различных фациальных условиях. В общем разрезе (рис.1) четвертичные отложения состоят из следующих стратиграфических единиц:

- Поздне-заальские льдистые отложения (древний ледовый комплекс);
- Пред-Эемские пойменные отложения;
- Эемские отложения термокарстовых водоемов;
- Ранне-вислинские аллювиальные отложения;
- Средне- и поздне-вислинские льдистые отложения (Ледовый комплекс, Едома);
- Поздне-ледниковые и голоценовые термокарстовые отложения.

Стратиграфическое строение разрезов разное в изученных нами регионах (Зигерт и др., 2009).

4. Методы исследования органического вещества

В рамках криолитологического исследования и литостратиграфического расчленения разрезов несколько сот образцов многолетнемерзлых пород было изучено с целью получить данные для реконструкции палео-экологической обстановки во время их формирования. Получены главные показатели, характеризующие органическое вещество: абсолютное содержание углерода (ТС), содержание органического (ТОС) и неорганического (ТИС) углерода, аналитический состав C/N и $\delta^{13}\text{C}$ органического материала (ОМ) в них. Значение ТОС отражает особенности биопродуктивности, характер аккумуляции и изменения органического вещества. Соотношение ТОС/N указывает на степень разложения органического материала под влиянием микробиологических и других почвообразовательных процессов. При этом низкое значение соответствует сильному разложению, а высокое незначительному. Общее содержание неорганического углерода (ТИС), которое рассчитывается по разнице между ТС и ТОС, обычно представлено карбонатами раковин моллюсков и остракод (Wetterich et al., [13] 2005, [9] 2009). Вариации в изотопном составе органического углерода ($\delta^{13}\text{C}$) указывают на его различное происхождение, связанное с условиями осадконакопления. Это обусловлено тем, что каждая среда (морское, наземное, субаэральное/субаквальное) характеризуется определенным составом растений, отличающихся в свою очередь по характеру изотопного фракционирования при углеродном метаболизме. При этом высокое значение $\delta^{13}\text{C}$ указывает на слабое разложение органического вещества, а низкое значение $\delta^{13}\text{C}$ на его сильное разложение. Наконец, по весовому содержанию льда в отложениях, отражающему условия их промерзания и оттаивания, разделялись сильно льдистые (50%), льдистые (25–50%) и слабо льдистые (<25%).

5. Характеристики органического вещества и содержание льда

Имеющееся в нашем распоряжении большое количество данных, характеризующих органическое вещество, показывает высокую степень их изменчивости в пределах отдельных стратиграфических единиц (рис. 2). Это указывает на значительные различия в местных ландшафтных условиях области аккумуляции, которые определяют растительный покров, почвенную влагу и условия промерзания. Как примеры могут служить: отложения аккумулятивных поверхностей с валиковыми полигонами, отложения водоемов и болот термокарстовых котловин, склона или дна котловин. Различия между стратиграфическими единицами в общем обусловлены изменениями палеоклиматических условий во время четвертичного периода и связанной с этим динамикой палео-ландшафтной обстановки и растительности. Специфические условия аккумуляции отложений определяются аллювиальными, пролювиальными, лимническими и другими процессами.

Рис. 2 Стратиграфическая классификация многолетнемерзлых отложений с помощью особенностей органического вещества (около 800 образцов)

6. Заключение

Учитывая представленную стратиграфическую и пространственную изменчивость углерода, аккумулярованного в многолетнемерзлых отложениях, то мы видим, что наше знание о количестве и качестве этого органического вещества недостаточно для того чтобы провести оценку в полном объеме. Поэтому все оценки и расчеты углерода в области многолетнемерзлых пород содержат много неточностей. Из этого следует необходимость провести картирование распространения и мощности многолетнемерзлых пород, в частности таких климатически весьма чувствительных как отложений Ледового комплекса (Едома) и термокарстовых котловин (аласов). Кроме того, нужно провести специфические биогеохимические анализы органического вещества способного к разложению. Дополнительно мы должны учитывать, что потеря углерода является не только поверхностным процессом, охватывающим выделение двуокси углерода и метана в атмосферу из мерзлых почв, но и включает внесение твердых частиц и растворенного органического вещества в гидросферу при деградации многолетнемерзлых толщ процессами термокарста и термоэрозии. Наконец, чтобы рассчитать абсолютный баланс углерода в области многолетнемерзлых пород необходимо оценить также современную аккумуляцию органического вещества.

7. Будущие исследования – углерод в многолетней мерзлоте – образование, изменение, выделение

Динамика углерода в системе многолетней мерзлоты строго взаимодействует с различными другими земными средами. Освобождение углерода из мерзлоты и его принос в атмосферу, и гидросферу происходят за счет поверхностных процессов в сезонноталом слое, при термокарстовых процессах и при эрозии морских, речных и озерных берегов под непосредственным воздействием воды. Устойчивость мерзлого органического вещества зависит в значительной степени от интенсивности местных и региональных изменений окружающей среды, результирующих в нарушении гидротермического равновесия многолетней мерзлоты. Изменение, разложение и выделение органического вещества происходит за счет микробиологических и биохимических реакций, и газовой выделению во время протаивания мерзлоты.

В будущем планируется провести как исследование разрезов многолетнемерзлых пород представляющих несколько климатических циклов, так и наблюдение за современной

динамикой различных мерзлотных ландшафтов в арктических районах Северо-востока Сибири. Скважины различной глубины, шурфы и береговые обнажения будут использованы для получения образцов многолетнемерзлых отложений разного состава, генезиса и возраста. С целью понять процессы образования и изменения органического вещества сборы образцов будут изучены при помощи различных методов криолитологии, геофизики, палеонтологии, биохимии и микробиологии. Чтобы оценить влияние динамики углерода в современных мерзлотных ландшафтах планируется изучить мерзлотные и экологические особенности местностей, в которых проводится исследование разрезов. С помощью комбинации данных, характеризующих ископаемый углерод, с данными о современном углеродном цикле в мерзлотных регионах должен быть получен более реальный прогноз будущего углеродного бюджета путем экосистемного моделирования.

Литература/ References

Зигерт К., Куницкий В.В., Ширмейстер Л. Отложения ледового комплекса – архив данных для реконструкции климата и экологии на побережье моря Лаптевых в позднем плейстоцене. – В кн.: Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. (Ответственные редакторы: Кассенс Х. и др.) – М.: Изд-во МГУ, 2009, с. 320-331.

1. Schirrmeister, L., V. Kunitsky, G. Grosse, S. Wetterich, H. Meyer, G. Schwamborn, O. Babiy, A. Derevyagin, and C. Siegert (2010), Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands - A review, *Quaternary International* (in press), doi:10.1016/j.quaint.2010.04.004.
2. Andreev, A.A., G. Grosse, L. Schirrmeister, S.A. Kuzmina, E.Yu. Novenko, A. A. Bobrov, P.E. Tarasov, T.V. Kuznetsova, M. Krbetschek, H. Meyer, and V.V. Kunitsky (2004), Late Saalian and Eemian palaeoenvironmental history of the Bol'shoy Lyakhovsky Island (Laptev Sea region, Arctic Siberia), *Boreas*, 33, 319-348, doi:10.1080/03009480410001974.
3. Andreev, A.A., G. Grosse, L. Schirrmeister, T.V. Kuznetsova, S.A. Kuzmina, A.A. Bobrov, P.E. Tarasov, E.Yu. Novenko, H. Meyer, A.Yu. Derevyagin, F. Kienast, A. Bryantseva, and V.V. Kunitsky (2009), Weichselian and Holocene palaeoenvironmental history of the Bol'shoy Lyakhovsky Island, New Siberian Archipelago. Arctic Siberia, *Boreas*, 38, 72-110, doi:10.1111/j.1502-3885.2008.00039.x.
4. Schirrmeister, L., C. Siegert, T. Kuznetsova, S. Kuzmina, A.A. Andreev, F. Kienast, H. Meyer, and A. Bobrov (2002a), Palaeoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia, *Quaternary International*, 89, 97-118.
5. Schirrmeister, L., C., Siegert, V.V. Kunitzky, P.M. Grootes, and H. Erlenkeuser, (2002b), Late Quaternary ice-rich permafrost sequences as an palaeoenvironmental archive for the Laptev Sea Region in northern Siberia, *International journal of earth sciences*, 91, 154-167. DOI 10.1007/s005310100205.
6. Schirrmeister, L., G. Grosse, G. Schwamborn, A.A. Andreev, H. Meyer, V.V. Kunitsky, T.V. Kuznetsova, M.V. Dorozhkina, E.Y. Pavlova, A.A. Bobrov, and D. Oezen, (2003), Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach, *Polar Geography*, 27, 277-319.
7. Schirrmeister, L., G. Grosse, V. Kunitsky, D. Magens, H. Meyer, A. Dereviagin, T. Kuznetsova, A. Andreev, O. Babiy, F. Kienast, M. Grigoriev, P.P. Overduin, and F. Preusser (2008), Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60,000 years (Western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk), *Polar Research*, 27 (2), 249-272. doi:10.1111/j.1751-8369.2008.00067.x.
8. Schirrmeister, L., G. Grosse, V.V. Kunitsky, M.C. Fuchs, M. Krbetschek, A.A. Andreev, A.A., U. Herzschuh, O. Babiy, C. Siegert, H. Meyer, Y.Y. Derevyagin, and S. Wetterich (2009), The mystery of Bunge Land (New Siberian Archipelago): Implications for its formation based on palaeo-environmental records, geomorphology, and remote sensing, *Quaternary Science reviews* (in press), doi:10.1016/j.quascirev.2009.11.017.
9. Schirrmeister, L., G. Grosse, M. Schnelle, M. Fuchs, M. Ulrich, V. Kunitsky, M. Grigoriev, A. Andreev, F. Kienast, H. Meyer, I. Klimova, O. Babiy, A. Bobrov, S. Wetterich, and G. Schwamborn (in press), Frozen paleo-environmental records from the western Lena Delta: Periglacial landscape dynamics in northern East

- Siberia during the Late Quaternary, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. doi:10.1016/j.quascirev.2009.11.017.
10. Wetterich S., S. Kuzmina, A.A. Andreev, F. Kienast, H. Meyer, L. Schirrmeister, and T. Kuznetsova (2008) Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia, *Quaternary Science Review*, 27 (15/16), 1523-1540. doi:10.1016/j.quascirev.2008.04.007.
 11. Wetterich, S., L. Schirrmeister, A.A. Andreev, M. Pudenz, B. Plessen., H. Meyer, and V.V. Kunitsky (2009), Eemian and Late Glacial/Holocene palaeoenvironmental records from permafrost sequences at the Dmitry Laptev Strait (NE Siberia, Russia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 279 (1-2), 73-95. doi:10.1016/j.palaeo.2009.05.002.
 12. Grosse, G., L. Schirrmeister, C. Siegert, V.V. Kunitsky, E.A. Slagoda, A.A. Andreev, and A.Y. Dereviagyn (2007), Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in northeast Siberia during the Late Quaternary, *Geomorphology*, 86, 25-51, doi:10.1016/j.geomorph.2006.08.005.
 13. Wetterich, S., L. Schirrmeister, and E. Pietrzyński (2005), Freshwater ostracodes in Quaternary permafrost deposits from the Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology*, 34, 363-376. doi:10.1007/s10933-005-5801-y.