

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.350.54 (268.52+61)

**ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ОСНОВНЫХ МЕРЗЛОТНО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ
ТИПАХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОЛУОСТРОВА БЫКОВСКИЙ:
СОДЕРЖАНИЕ И ГРУППОВОЙ СОСТАВ ГУМУСА**

А.Л. Холодов, Б.Н. Золотарева, Л.Т. Ширшова

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, Московская обл., Россия, akholodov@issp.psn.ru*

Оценены особенности органического вещества в различных мерзлотно-генетических типах четвертичных отложений центральной части моря Лаптевых. Определены характеристики гумуса (содержание гумуса, соотношение гуминовых и фульвокислот). Установлены различия в степени трансформированности органического вещества в разных типах отложений. Оценено влияние условий формирования отложений на характеристики содержащегося в них органического вещества.

Многолетнемерзлые четвертичные отложения арктического побережья, органическое вещество, гумус, криолитологические особенности отложений

**ORGANIC MATTER IN THE MAIN TYPES
OF FROZEN QUATERNARY DEPOSITS OF THE BYKOVSKY PENINSULA:
TOTAL CONTENT AND GROUP COMPOSITION OF THE HUMUS**

A.L. Kholodov, B.N. Zolotareva, L.T. Shirshova

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, 142290,
Pushchino, Moscow Region, Russia, akholodov@issp.psn.ru*

Peculiarities of organic matter in different types of frozen Quaternary deposits in the central part of the Laptev Sea coast were estimated. The characteristics of humus were determined (humus content, ratio of humic and fulvic acids). Differences in the degree of organic matter transformation in different types of deposits were established. Influence of the formation conditions of deposits on the characteristics of their organic matter was estimated.

Permanently frozen Quaternary deposits of Arctic Coast, organic matter, humus, cryolithological peculiarities of deposits

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что органическое вещество (ОВ) донных осадков морей восточного сектора Российской Арктики (Лаптевых и Восточно-Сибирского) является аллохтонным, т. е. привнесенным с континента в результате размыва берегов и с речным стоком [Органическое..., 1990; Кошелева, Яшин, 1999; Романкевич, Ветров, 2001]. Разными авторами объем углерода, поступающего в арктический бассейн при размыве берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, оценивается от $1,5 \cdot 10^6$ до $4 \cdot 10^6$ т/год [Холодов и др., 2003]. В то же время, по оценкам Кошелевой и Яшина [1999], за 1000 лет в донных осадках этих морей накапливается $0,661 \cdot 10^9$ т органического углерода. Легко подсчитать, что за этот период только за счет абразии бе-

рега в Северный Ледовитый океан (СЛО) выносятся от $1,5 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ т углерода [Rachold et al., 2003], т. е. в 3–5 раз больше. Это говорит о том, что для оценки реального вклада процесса абразии арктического побережья в современный глобальный цикл углерода недостаточно оценивать общие запасы ОВ в мерзлых отложениях. Не менее важной является информация о степени биохимической трансформации органического материала, определяющей соотношение устойчивых и лабильных фракций.

Одной из важных характеристик, отражающих особенности трансформации органического вещества, является содержание и качественный состав гуминовых веществ (ГВ), для описания ко-

торых используется традиционная система показателей в современной интерпретации [Орлов, Бирюкова, 2005].

Настоящее исследование сфокусировано на изучении фракционно-группового состава гуминовых веществ [Пономарева, Плотникова, 1980] в основных мерзлотно-генетических типах четвертичных отложений Быковского п-ова.

Криолитологические особенности мерзлых четвертичных отложений участка исследований были достаточно хорошо изучены в XX в. [Куницкий, 1989; Слагода, 2004; Schirrmeister et al., 2002; Sher et al., 2004], что создает хорошую базу для интерпретации полученных данных об особенностях органогенной составляющей различных мерзлотно-генетических типов отложений.

Полевые исследования проводились в 2001, 2003 и 2004 гг. и включали колонковое бурение (с использованием станка УКБ-12/25) с описанием керна и отбором образцов, а также последующие геотемпературные наблюдения в скважинах. Было пробурено пять скважин, вскрывших основные мерзлотно-генетические типы четвертичных отложений, распространенных на Быковском п-ове. Две скважины были пройдены с поверхности останцов позднеплейстоценовой аккумулятивной равнины, одна на склоне и две на днище термокарстовых котловин (аласов).

УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Быковский полуостров расположен к юго-востоку от дельты Лены и представляет собой аккумулятивную равнину с абсолютными высотами 20–40 м, сильно расчлененную овражной эрозией и термокарстовыми котловинами с абсолютными высотами днищ 4–6 м. В пределах останцов аккумулятивной позднеплейстоценовой равнины (едомы) преобладает мохово-травяной растительный покров, в аласных котловинах – мохово-лишайниковый.

Район расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) [Геокриология СССР, 1989]. Мощность ММП здесь составляет 500–600 м. Сезонное протаивание не превышает глубин 40–50 см на едоме и 35–40 см на аласах. Среднегодовая температура пород на возвышенностях составляет -10°C , в аласных котловинах она равна -9°C . Под озерами и морскими лагунами существуют несквозные талики мощностью от 15–20 м под солончатыми лагунами и до 40 м под пресноводными озерами.

ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже приведены основные мерзлотно-генетические типы четвертичных отложений Быковского п-ова.

Позднеплейстоценовые озерно-аллювиальные отложения едомной свиты (ледовый комплекс, далее ЛК) залегают в интервале абсолютных высот от 40 до 10–15 м на восточном побережье полуострова [Куницкий, 1989; Холодов и др., 2003; Слагода, 2004] и от 0 до 5 м в районе мыса Раздельный на западе [Слагода, 2004]. Представлены преимущественно тяжелой супесью с прослоями и линзами песка тонкозернистого и включениями слаборазложившегося торфа. В разрезе отмечаются многочисленные корешки растений.

Отложения содержат крупные сингенетические ледяные жилы, образующие полигональную решетку. Объемная льдистость массива за счет как сегрегационного, так и повторно-жильного льда может достигать 80–90 %.

Многие исследователи [Слагода, 2004; Schirrmeister et al., 2002; Sher et al., 2004] в этих отложениях выделяют четыре горизонта.

Зырянский ледовый комплекс. Абсолютные отметки от 15 до 10 м. Формирование этого горизонта происходило в сухих холодных условиях континентального климата. Горизонт характеризуется высокими значениями весовой льдистости (50–100 %). Криогенные текстуры слоистые с поясками атакситовой. Отдельные песчаные прослои имеют массивную криотекстуру.

Каргинский ледовый комплекс. Интервал залегания составляет 23–10 м над уровнем моря. Формирование происходило в контрастных климатических и ландшафтных условиях. Короткопериодные потепления приводили к замедлению осадконакопления и формированию эпигенных почв. Датирование этого горизонта дает основания предположить замедление темпов седиментации при формировании прослоев, залегающих в настоящее время в интервалах высот 21–19, 17–15 и 13 м над уровнем моря (рис. 1). Такое замедление могло быть связано с кратковременными изменениями положения базиса эрозии, обусловленными колебаниями уровня моря в теплые периоды каргинского интерстадиала 50–45 тыс. лет назад (раннекаргинское потепление), 43–33 (Малохетское потепление) и 30–22 тыс. лет назад (Липовско-Новоселовское потепление) [Кинд, 1974]. В пользу этой гипотезы говорит факт широкого регионального распространения таких горизонтов в каргинских отложениях на территории приморских низменностей Якутии [Губин и др., 2003; Pitulko et al., 2004]. Горизонт представлен супесью тяжелой с прослоями легкого пылеватого суглинка. Отмечаются торфяные включения, приуроченные к горизонтам погребенных почв, промерзавших по квазисинкриогенному механизму [Каневский, 1991], т. е. при стабильном положении дневной поверхности за счет сокращения глубины СТС (рис. 2). Последнее происходило, по-видимому, в связи с изменением охлаждающей роли растительного

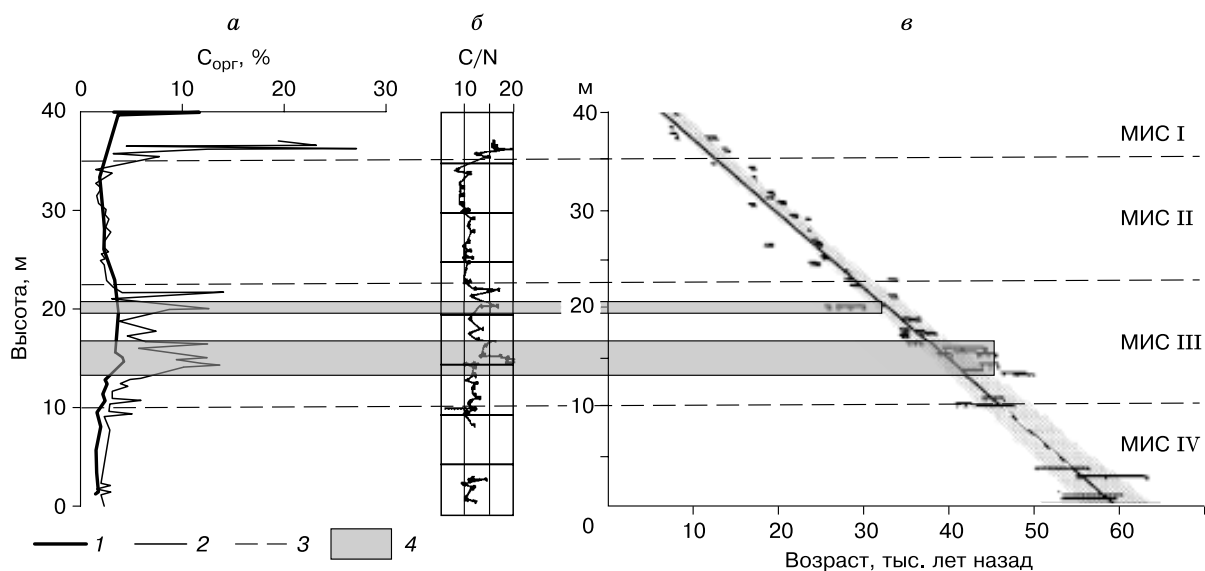


Рис. 1. Распределение органического углерода (а), соотношение С и N (б) и соотношение положения (в) в разрезе (высоты над уровнем моря) и возраста отложений (по данным [Schirmeister et al., 2002]) (в) в массиве ледового комплекса на Быковском п-ове.

1 – данные [Холодов и др., 2003]; 2 – данные [Schirmeister et al., 2002]; 3 – границы горизонтов; 4 – горизонты погребенных почв; морские изотопные стадии: МИС I – покровный слой; МИС II – сартанский ЛК; МИС III – каргинский ЛК; МИС IV – зырянский ЛК (поясн. в тексте).

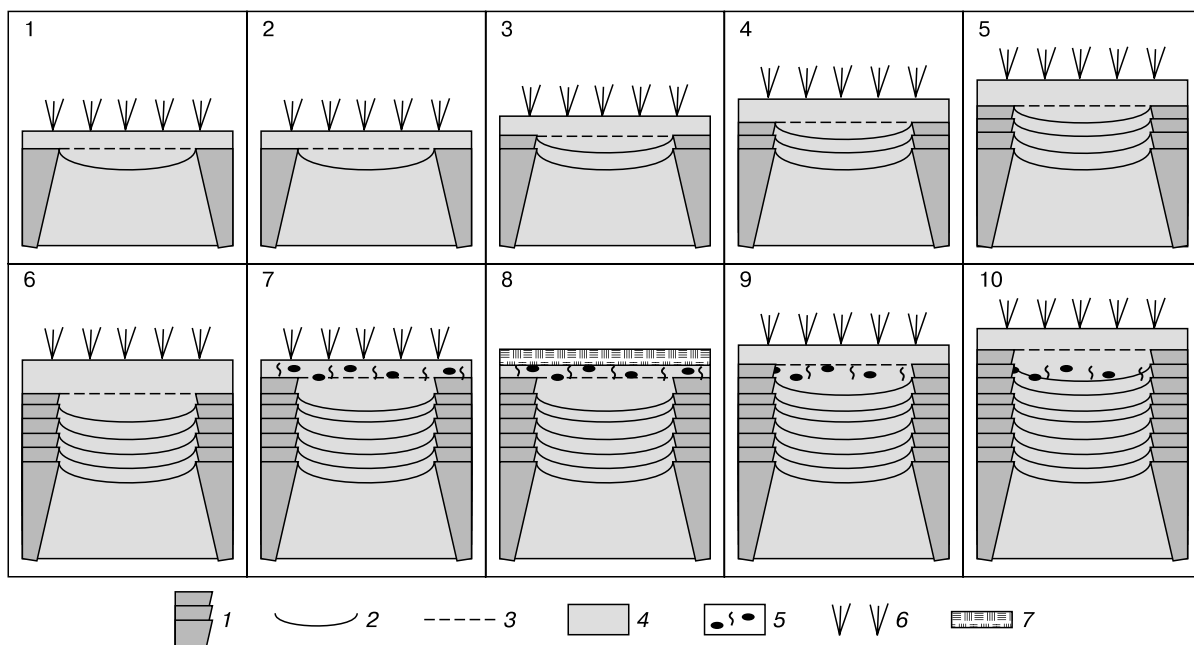


Рис. 2. Схема формирования отложений ледового комплекса по синкриогенному (1–5, 9–10) и квази-синкриогенному (6–8) механизмам.

1 – сингенетический повторно-жильный лед; 2 – сегрегационный лед криогенных текстур; 3 – подошва СТС; 4 – грунт; 5 – торфяные включения и гумифицированная почвенная органика; 6 – пионерная степная растительность, представленная осокой и разнотравьем; 7 – мохово-лишайниковый покров.

покрова при его естественной сукцессии (вытеснении высших растений мохово-лишайниковыми видами). Криогенная текстура погребенных почв преимущественно атакситовая. Вмещающие породы характеризуются сетчатой и слоистой криотекстурами.

Сартанский ледовый комплекс. Абсолютные отметки 35–23 м. Формирование происходило в суровых криоаридных континентальных условиях. Горизонт сложен супесью тяжелой с прослоями тонкозернистого песка. Отмечены многочисленные корешки растений. Криогенная текстура слоистая мелко- и микрошлировая с поясками сетчатой толщиной в первые сантиметры. Общая льдистость (весовая) 50–100 %.

Покровный слой залегает на абсолютных отметках 40–35 м. Формировался в период голоценового потепления в относительно теплых и влажных условиях [Слагода, 2004; Schirmeister et al., 2002]. Горизонт представлен тяжелой супесью, серой, отофованной. Отмечаются многочисленные корешки. Криогенная текстура преимущественно атакситовая, в торфяных прослоях микрошлировая, повторяющая структуру торфа. Весовая влажность (льдистость) близка к 100 %.

Позднеплейстоценово-голоценовые таберальные отложения. Формирование этого мерзлотно-генетического типа связано с активизацией процессов термокарста, имевших место в изучаемом регионе на рубеже позднего плейстоцена и голоцена [Романовский и др., 1999]. Отложения распространены в пределах аласных котловин. На Быковском п-ове таберальные отложения повсеместно залегают ниже уровня моря. Их мощность определяется мощностью и льдистостью протаивавших массивов ледового комплекса и обычно составляет 10–12 м. Отложения представлены супе-

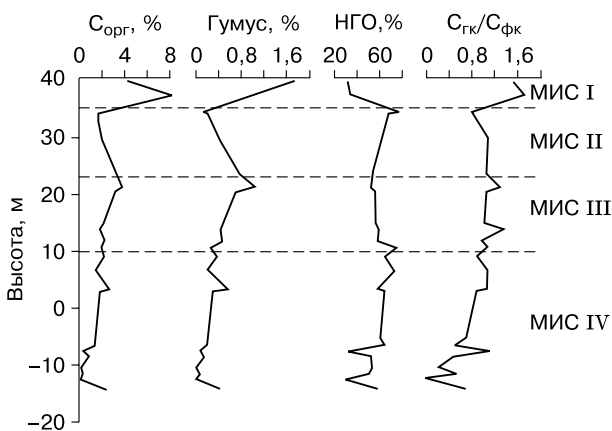


Рис. 3. Содержание $C_{орг}$, гумуса, негидролизуемого остатка и соотношение гуминовых и фульвокислот в синкриогенных отложениях ледового комплекса на Быковском п-ове.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

сью серой с прослоями и линзами песка. Весовая влажность (льдистость) 50–60 %. Криогенные текстуры преимущественно массивные или слоистые. В краевых частях аласных котловин отмечаются вертикально-слоистые и сетчатые (с вертикально ориентированными блоками) криотекстуры, что определяется характером промерзания массивов.

Голоценовые озерно-болотные отложения аласных котловин. Этот тип отложений слагает верхнюю часть разреза аласных котловин. Формирование этой литологической разности происходило в условиях мелководных озер и болот при климате, близком к современному. Мощность пачки 3–4 м. Отложения представлены легким пылеватым суглинком. Сильно оторфованы, торф слабо-разложившийся. В разрезе встречаются многочисленные растительные остатки. Весовая влажность (льдистость) достигает 150–200 %, в торфяных прослоях – до 400 %. Криогенные текстуры атакситовые и слоистые. В торфяных включениях сегрегационное льдовыделение носит унаследованный характер (т. е. повторяет структуру торфа). Отложения содержат сингенетические ледяные жилы, образующие полигональную решетку.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание общего органического углерода в образцах отложений и препаратах гуминовых веществ определяли методом мокрого сжигания [Аринушкина, 1962]. Фракционно-групповой состав ГВ анализировали по стандартной методике Пономаревой и Плотниковой [1980].

Для характеристики органического вещества исследованных отложений используются: отношение углерода гуминовых кислот к общему углероду образца ($C_{гк}/C_{орг}$) и соотношение углерода гуминовых и фульвокислот ($C_{гк}/C_{фк}$) как показатели гумификации органического материала; содержание негидролизуемого остатка (НГО), рассматриваемого как пул органического вещества, потенциально доступного для трансформации.

Результаты исследований приведены на рис. 3, 4 и в таблице.

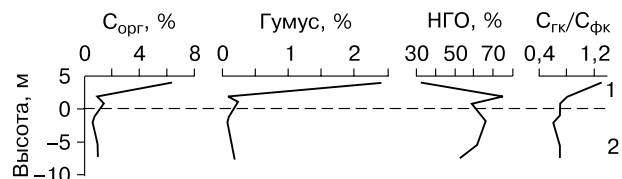


Рис. 4. Содержание $C_{орг}$, гумуса, негидролизуемого остатка и соотношение гуминовых и фульвокислот в отложениях аласного комплекса на Быковском п-ове.

Штриховая линия – граница аласных (1) и таберальных (2) отложений.

Характеристики* гумуса в различных мерзлотно-генетических типах отложений Быковского полуострова

| Тип отложений | Кол-во образцов | $C_{орг}$, % | $C_{гум}$, % | $C_{гк}/C_{фк}$ | НГО, % |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Ледовый комплекс | 21 | $\frac{1,27}{1,49}$ (0,14) | $\frac{0,19}{-}$ (0,02) | $\frac{0,80}{1,08}$ (0,09) | $\frac{62,28}{53,30}$ (2,93) |
| Погребенные почвы | 9 | $\frac{2,68}{-}$ (0,20) | $\frac{0,58}{-}$ (0,07) | $\frac{1,01}{0,98}$ (0,05) | $\frac{58,23}{-}$ (1,22) |
| Аласные озерно-болотные | 10 | $\frac{2,33}{-}$ (0,51) | $\frac{0,48}{-}$ (0,22) | $\frac{1,28}{-}$ (0,15) | $\frac{70,35}{67,60}$ (5,12) |
| Таберальные | 4 | $\frac{0,84}{-}$ (0,09) | $\frac{0,14}{-}$ (0,03) | $\frac{0,68}{0,70}$ (0,03) | $\frac{60,55}{-}$ (3,06) |

* В числителе – среднее значение, в знаменателе – модальное значение, в скобках – стандартное отклонение.

Установлено, что зырянский и сартанский горизонты ледового комплекса, формировавшиеся в холодных континентальных условиях, характеризуются средними значениями общего содержания углерода 1,2–1,5 %. Содержание гуминовых кислот составляет 15 % от общего содержания углерода. В составе гумуса преобладают фульвокислоты (соотношение гуминовых и фульвокислот $C_{гк}/C_{фк} = 0,8$). Все это указывает на слабую степень гумификации органического материала [Орлов, Бирюкова, 2005]. На долю негидролизующего остатка приходится от 50 до 60 % углерода.

В то же время в формировавшихся в каргинское время горизонтах погребенных почв содержание углерода достигает 2,68 %, а по сведениями некоторых исследователей [Schirmeister et al., 2002] и более – 10–14 %. Степень гумификации здесь несколько выше, о чем свидетельствует более высокое содержание гуминовых кислот (порядка 20 %) (см. рис. 3, таблицу), а также более высокое значение отношения гуминовых и фульвокислот. Все это указывает на более высокую степень трансформации ОБ в этих горизонтах по сравнению с вмещающими отложениями (см. таблицу). Соотношение С и N в горизонтах погребенных почв меняется от 15 до 20, тогда как во вмещающих отложениях оно равно 10 [Schirmeister et al., 2002] (см. рис. 1).

В целом для толщи синкриогенных отложений ледового комплекса характерна хорошая степень корреляции общих запасов углерода и степени гумификации ОБ (см. рис. 3). Коэффициент корреляции (r) равен 0,94 (рис. 5).

Аласные отложения характеризуются большим разбросом значений содержания углерода, что может объясняться изменением фациальных условий (озерные или болотные) при их формировании. Среднее значение содержания углерода 2,33 %. Степень гумификации здесь достаточно низкая (порядка 20 %), однако в составе гуминового комплекса преобладают гуминовые кислоты (соотношение $C_{гк}/C_{фк} = 1,28$). Необходимо отметить также относительно высокую долю негидролизующего остатка в этих отложениях (см. рис. 4).

Таберальные отложения характеризуются наименьшими запасами углерода (0,84 %) и невысоким пулом гуминовых кислот. Соотношение гуминовых и фульвокислот порядка 0,7. Сравнение запасов $C_{орг}$ в таберальных отложениях и исходных синкриогенных отложениях ледового комплекса дает основание предположить, что протаивание последних в субаквальных условиях сопровождалось разложением до 50 % ОБ исходных отложений. При этом имели место формирование и последующая консервация биогенных газов (CH_4 и CO_2), значительные концентрации которых отмечаются в отложениях аласного комплекса [Рувкина и др., 1993; Kholodov et al., 2004].

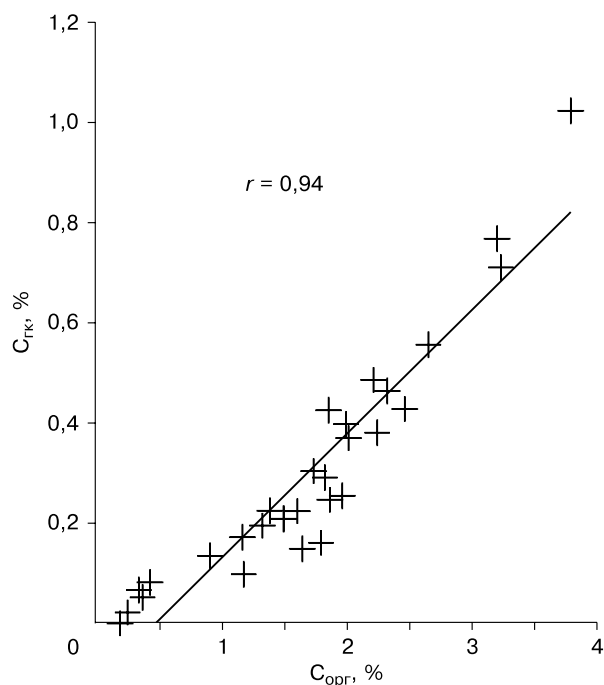


Рис. 5. Корреляция содержания органического углерода ($C_{орг}$) и углерода гуминовых кислот ($C_{гк}$) в отложениях ледового комплекса.

ВЫВОДЫ

Все изученные типы отложений характеризуются достаточно высоким содержанием гумуса (углерод гуминовых веществ составляет 17–20 % от общего содержания).

По степени гумификации наиболее трансформированным является органический материал аласных отложений и горизонтов ЛК, формировавшихся в относительно теплые периоды. В этих горизонтах до 20 % запасов углерода представлены устойчивыми гуминовыми веществами. Органическое вещество синкриогенных и таберальных отложений является наименее гумифицированным. Доля устойчивой фракции, представленной гуминовыми кислотами, здесь порядка 15 %.

По соотношению содержания гуминовых и фульвокислот изученные отложения можно разделить на две группы. К первой относятся синкриогенные отложения ледового комплекса и таберальные отложения. В них преобладают фульвокислоты (соотношение $C_{гк}/C_{фк} = 0,7–0,8$). Ко второй группе относятся аласные отложения и квазисинкриогенные погребенные почвы, характеризующиеся преобладанием гуминовых кислот ($C_{гк}/C_{фк} = 1,01–1,28$).

Все мерзлотно-генетические типы отложений, распространенных на Быковском п-ове, характеризуются большим содержанием негидролизуемого остатка (60–70 %).

Запасы органического вещества и степень его трансформации в синкриогенных толщах определяются соотношением темпов осадконакопления и перехода отложений в многолетнемерзлое состояние. Замедление осадконакопления приводит к накоплению в соответствующем горизонте больших запасов органического углерода, с одной стороны, и к более высокой степени его трансформации за счет процессов почвообразования – с другой.

По степени гумификации наиболее трансформированным является органический материал аласных отложений и горизонтов ЛК, формировавшихся в относительно теплые периоды. В этих горизонтах до 20 % запасов углерода представлены устойчивыми гуминовыми веществами. Органическое вещество синкриогенных и таберальных отложений является наименее гумифицированным. Доля устойчивой фракции, представленной гуминовыми кислотами, здесь порядка 15 %.

Все вышеперечисленное свидетельствует о высоком (до 80–90 %) содержании лабильного органического вещества в мерзлых четвертичных отложениях исследуемого региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-05-64062), INTAS (код проекта YS 04-83-2950) и гранта Президента РФ по поддержке молодых российских ученых и научных школ (грант № МК-1136.2005.5).

Литература

- Аринушкина Е.В.** Руководство по химическому анализу почв. М., Изд-во МГУ, 1962, 491 с.
- Геокриология СССР.** Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 515 с.
- Губин С.В., Занина О.Г., Максимович С.В. и др.** Реконструкция условий формирования отложений ледового комплекса по результатам изучения позднеплейстоценовых нор грызунов // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 13–22.
- Каневский М.З.** Роль квазисингенеза в формировании криогенного строения мерзлых четвертичных отложений северной Якутии // Верхние горизонты мерзлых толщ. М., Наука, 1991, с. 47–63.
- Кинд Н.В.** Геохронология позднего антропогена по изотопным данным. М., Наука, 1974, 255 с.
- Кошелева В.А., Яшин Д.С.** Донные осадки Арктических морей России / Под ред. И.С. Грамберга. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.
- Куницкий В.В.** Криолитология низовья Лены. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1989, 162 с.
- Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана** / Под ред. А.И. Данюшевской. Л., Недра, 1990, 280 с.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н.** Система показателей гумусного состояния почв // Методы исследования органического вещества почв. Владимир, ВНИИ ПТИОУ, 2005, с. 6–17.
- Пономарева В.В., Плотникова Т.А.** Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л., Наука, 1980, 221 с.
- Ривкина Е.М., Самаркин В.А., Гиличинский Д.А.** Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индибирской низменности // Докл. РАН, 1993, вып. 323, № 3, с. 559–562.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А.** Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др.** Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 79–91.
- Слагода Е.А.** Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень, ИП центр “Экспресс”, 2004, 120 с.
- Холодов А.Л., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А. и др.** Оценка количества органического вещества, поступающего в арктический бассейн при термоабразии побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 3–12.
- Kholodov A.L., Rivkina E.M., Snytin P.S., Borisov R.R.** Frozen Quaternary deposits of Laptev Sea coast as a source of organic matter and biogenic gases // Rep. on Polar Res., 2004, vol. 482, p. 117–124.
- Pitulko V.V., Nikolsky P.A., Giryа E.Yu. et al.** The Yana RHS site: Humans in the Arctic before the Last Glacial Maximum // Science, 2004, No. 303, p. 52–56.
- Rachold V., Eicken H., Gordeev V.V. et al.** Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // Organic Carbon cycle in the Arctic Ocean: Present and past / R. Stein, R.W. Macdonald (eds.). Berlin, Springer Verlag, 2003, p. 33–55.
- Schirrmeister L., Siegert Ch., Kuznetsova T. et al.** Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // Quatern. Intern., 2002, No. 89, p. 97–118.
- Sher A.V., Kuzmina S.A., Kuznetsova T.V., Sulerzhitsky L.D.** New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants, and mammals // Quatern. Sci. Rev., 2004, No. 245, p. 33–569.

Поступила в редакцию
2 февраля 2006 г.